Journal of Agroecology
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

Research Article
Vol. 14, No. 4, Winter 2023, p. 649-669

Effect of Biochar, Nitrogen Fertilizer and *Azospirillum lipofrom* on Nitrogen Use Efficiency Indices of Rice Plant in Flooded and Alternation Irrigation

Mohammad Kaveh[1], Mohammad Ali Esmaeli[2], Hematollah Pirdashti[3*] and Mohammad Reza Ardakani[4]

Received: 17-10-2020
Revised: 16-07-2021
Accepted: 24-07-2021
Available Online: 24-07-2021

How to cite this article:
Kaveh, M., Esmaeli, M.A., Pirdashti, H.A., and Ardakani, M.R., 2023. Effect of biochar, nitrogen fertilizer and *Azospirillum lipofrom* on nitrogen use efficiency indices of rice plant in flooded and alternation irrigation. Journal of Agroecology 14(4): 649-669.
DOI: 10.22067/agry.2021.20321.0

Introduction

Nitrogen (N), an essential nutrient for growth and development of plants, is added to agricultural fields to boost crop yields, however, its applications limited in the aquatic ecosystems due to leaching. Accordingly, accelerated surface water eutrophication, and public health issues due to consumption of contaminated groundwater have been linked to enrichment of excess use of N that can be lost to the environment through leaching to the groundwater. These losses can be reduced by adoption of appropriate methods or best management practices, that increase the accessibility of N for plant use, enhance plants' N uptake ability, and match nutrient applications with agronomic needs. Thus, improving N use efficiency through a combination of agronomic and soil management methods is critical for crop profitability and environmental management.

One way to improve the efficiency of nitrogen fertilizer application and reduce its losses is the simultaneous use of organic and biological fertilizers along with chemical fertilizers. There are several ways to increase soil organic matter, but the most of these materials are not resistant to microbial decomposition and decompose quickly and lost from the soil. Biochar is one of the types of organic fertilizers, which is resistant to microbial decomposition.

Biochar can affect chemical and biological N reactions in the soils. Biochar increase nitrogen use efficiency (NUE), influence nitrification rates and adsorption of ammonia, and improve NH^{+} accumulation by enhancing cation exchange capacity in soils.

Nitration of groundwater due to improper use of chemical fertilizers and high leaching of nitrogen fertilizers and also low efficiency of nitrogen application in flood irrigation of rice, indicates the need for alternate management methods in rice cultivation, including changing irrigation methods and fertilizers types. The use of biochar fertilizer along with nitrogen-fixing bacteria in rice irrigation rotation can be a good solution to reduce the mentioned problems.

Materials and Methods

This research was conducted at the research fields of the Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU) in 2017. The experimental site is located at 36º 39′42″ N latitude and 53º03′54″ E longitude with -11 m above sea level. Soil samples were taken from depths of 0-30 cm before land preparation. The

1- Ph.D. Student of Agronomy, Department of Agriculture, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Mazandaran, Iran.
2- Associate Professor of Agronomy, Department of Agriculture, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Mazandaran, Iran.
3- Professor of Agronomy, Department of Agriculture, Genetics and Agricultural Biotechnology Institute of Tabarestan, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Mazandaran, Iran.
4- Professor of Agronomy, Department of Agronomy, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.
(*- Corresponding author's Email: h.pirdashti@sanru.ac.ir)

experiment was done in split split plot arrangement based a complete randomized blocks design with three replications. Two irrigation regimes (flooding and irrigation regimes) was the main plot. Nine fertilizers levels (100% of recommended nitrogen or N100, N100+ 10 ton biochar or biochar 10, N100+ biochar 20, N75, N75+ biochar 10, N100+ biochar 20, N50, N50+ biochar 10 and N100+ biochar 20) and seedling inoculation with *Azospirillum lipoferum* (without inoculation was also included as control) were sub and sub sub plots, respectively.

Results and Discussion

Results showed that biochar and nitrogen fertilizers, irrigation methods and also seedling inoculation with bacteria had significant effects on NUE, the amount of nitrogen and protein in the rice grains. Mean comparison of combination effects showed that consumption of 20 tons of biochar along with N50 or N75 had the greatest effect on NUE and the amount of nitrogen and protein in the grain, and the lowest amount of these traits was recorded in plots with N100 and no application of biochar. On the other hand, the highest level of nitrogen efficiency indices was obtained when 20 tons of biochar applied with N50 or N75 while the lowest amount of nitrogen use efficiency indices was obtained by using N100 and no biochar consumption.

Conclusion

It seems that biochar improves nitrogen uptake by the rice plant by maintaining nitrogen in the soil and consequently increases the concentration of nitrogen in the grains and rice plants organs. There was no similar trend for effect of biochar on nitrogen uptake when fertilizer application rates increased.

Keywords: Agronomical management, Grain nitrogen concentration, Nitrogen productivity, Organic and biological fertilizers.

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

مقاله پژوهشی

اثر بایوچار،کود نیتروژن و باکتری *آزوسپیریلوم لیپوفروم* بر شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن گیاه برنج در شرایط آبیاری غرقاب و متناوب

محمد کاوه[1]، محمدعلی اسماعیلی[2]، همت‌الله پیردشتی[3*] و محمدرضا اردکانی[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲

کاوه، م.، اسماعیلی، م.ع.، پیردشتی، ه.ا.، و اردکانی، م.ر.، ۱۴۰۱. اثر بایوچار،کود نیتروژن و باکتری *آزوسپیریلوم لیپوفروم* بر شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن گیاه برنج در شرایط آبیاری غرقاب و متناوب. بوم‌شناسی کشاورزی ۱۴(۴): ۶۶۹-۶۴۹.

چکیده

نیتروژن، یک عنصر ضروری برای گیاهان می‌باشد، به‌منظور بررسی شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن برنج در تلفیق با بایوچار، باکتری *آزوسپیریلوم لیپوفروم* و نیتروژن در شرایط آبیاری غرقابی و تناوبی، آزمایشی به‌صورت کرت‌های دو بار خرد شده در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار در شهر ساری در سال ۱۳۹۶ انجام گرفت. عامل اصلی، روش آبیاری در دو سطح آبیاری غرقاب و تناوبی و عامل فرعی تیمار کودی در نه سطح، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیتروژن به‌همراه صفر، ۱۰ و ۲۰ تن بایوچار در هکتار و عامل فرعی-فرعی، باکتری *آزوسپیریلوم لیپوفروم* در دو سطح بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی با گیاهچه بود. نتایج نشان داد، بایوچار و نیتروژن، روش‌های آبیاری و باکتری تأثیر معنی‌داری بر شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن داشتند. کاربرد ۲۰ تن بایوچار به‌همراه ۵۰ درصد نیتروژن و با مصرف باکتری توانست موجب افزایش معنی دار بهره‌وری نسبی نیتروژن (به‌ترتیب ۸۴/۵۴ و ۶۸/۵ کیلوگرم دانه بیشتری در ازای مصرف نیتروژن در آبیاری غرقاب و تناوبی) نسبت به تیمار ۱۰۰ درصد نیتروژن + بدون مصرف بایوچار و باکتری شود. در نتیجه مصرف هم‌زمان کود آلی و زیستی همراه با کود نیتروژن، قابلیت دسترسی و جذب نیتروژن را در مراحل مختلف رشد گیاه افزایش داده و در پی آن، سبب بهبود شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن می‌شود. امّا، این اثر بایوچار بر حفظ نیتروژن در خاک، با میزان مصرف کود نیتروژن با یک نرخ افزایش نمی‌یابد. در مقایسه با شرایط غرقابی، به‌کارگیری باکتری در آبیاری تناوبی تأثیر معنی‌داری بر جذب و بهبود شاخص‌های کارایی نیتروژن نداشت.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری نیتروژن، غلظت نیتروژن دانه، کودهای آلی و زیستی، مدیریت زراعی

۱- دانشجوی دکتری، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران.
۲- دانشیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران.
۳- استاد گروه زراعت، پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران.
۴- استاد گروه زراعت، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: h.pirdashti@sanru.ac.ir)

DOI: 10.22067/agry.2021.20321.0

مقدمه

برآورد شده است که تا سال ۲۰۵۰، تقاضای جهانی برای برنج (*Oryza sativa* L.) دو برابر خواهد شد، در نتیجه میزان تولید فعلی باید سالیانه ۲/۴ درصد افزایش یابد تا نیاز غذایی جمعیت رو به رشد تأمین شود (Ray et al., 2013). نیتروژن یکی از مهم‌ترین عوامل کلیدی در تولید برنج است و نقش مهمی در افزایش عملکرد دانه ایفا می‌کند (Hofmeier et al., 2015). نیتروژن مهم‌ترین عنصر محدودکننده تولیدات زراعی است و به‌همین علت نیز به‌صورت کودهای شیمیایی در سطح وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد (Semenov, 2007). در طول پنج دهه گذشته، مصرف جهانی نیتروژن تقریباً هشت برابر افزایش پیدا کرده است (Wu et al., 2016) و پیش‌بینی می‌شود که مصرف کودهای نیتروژنی در سراسر جهان تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۱۴۲ میلیون تن (۳۷/۵ درصد افزایش نسبت به حال حاضر) برسد (Motesharezadeh et al., 2017). در ایران متأسفانه اطلاعات چندانی درباره میزان کارایی مصرف نیتروژن در مقیاس بزرگ برای غلات مانند گندم (*Triticum aestivum* L.)، جو، ذرت (*Zea mays* L.) و برنج (*Oryza sativa* L.) وجود ندارد، امّا از میزان متوسط عملکرد غلات به متوسط کود نیتروژنی مصرفی در ایران، بهره‌وری ناخالص نیتروژن طی ۱۰ سال مورد مطالعه، ۳۸ کیلوگرم در کیلوگرم بوده که از میانگین جهانی کمتراست - (Keshavarz, 2013).

تولید روز افزون کودهای شیمیایی در سراسر جهان از مهم‌ترین منابع افزایش نیتروژن در زمین است. منابع آلی و غیر آلی نیتروژن طی فرآیندهای معدنی شدن، هیدرولیز و نیتریفیکاسیون به نیترات تبدیل می‌شوند (Fields, 2004). در یک گزارش، میزان هدررفت نیتروژن از شالیزاری برنج بین ۲۷ تا ۳۵ کیلوگرم در هکتار عنوان شده است (Moallim et al., 2018). تحقیقات نشان داده است که در مناطق با ورودی نیتروژن بالا و خاک‌های با زه‌کشی خوب، آب‌های زیرزمینی در معرض خطر تجمع نیترات می‌باشند (Nolan et al., 2002; Ri-Feng et al., 2014). آب‌شویی و هدررفت املاح مختلف نیتروژن‌دار منجر به پایین آمدن کارایی کودهای نیتروژنی در تولید محصولات زراعی می‌شود، بهبود کارآیی مصرف نیتروژن یک راهبرد کلیدی جهت پیشرفت سیستم‌های کشاورزی پایدار است که منجر به رسیدن به حداکثر عمل‌کرد در ازای مصرف حداقل نهاده‌ها و هدررفت نیتروژن می‌شود (Sharpe, 2001). افزایش مصرف کود نیتروژن با کاهش کارایی مصرف نیتروژن[1] همراه خواهد بود (Hussain et al., 2018). بخش زیادی از نیتروژن مصرف شده از طریق کود شیمیایی در سیستم خاک–گیاه تلف می‌شود. کارایی پایین مصرف نیتروژن در برنج غرقابی به تلفات نیتروژن در اثر آب‌شویی، تصعید آمونیاک و دنیتریفیکاسیون مربوط است. این موضوع نه تنها هزینه‌های تولید محصول را افزایش می‌دهد، بلکه باعث تهدید سلامتی انسان و پایداری زیست‌بوم‌های طبیعی می‌شود. بنابراین، بهبود مصرف نیتروژن در تولید برنج، مزایای اقتصادی و زیست محیطی قابل‌توجهی برای کشاورزی درپی خواهد داشت (Fageria & Santos, 2018).

کارایی مصرف نیتروژن در برنج عموماً پایین و در گستره جهانی بین ۲۵ تا ۴۵ درصد و به‌طور متوسط حدود ۳۵ درصد است (Guang et al., 2017). رویکردهای مدیریت نیتروژن مانند مقدار و زمان مناسب مصرف کود (Roberts, 2008)، روش مناسب مصرف کود، جای‌گذاری عمقی کودهای نیتروژنی (Redfern et al., 2013) و استفاده از انواع اصلاح شده کود اوره و کودهای کندرها (Xina et al., 2017)، کودهای نانو (Agrawal & Rathore, 2014)، استفاده از قابلیت باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن (Ghaffari et al., 2018) و راهبردهای مبتنی بر ماده آلی خاک و گیاه (Prasad & Mailapalli, 2018) از جمله گزینه‌های افزایش کارایی مصرف نیتروژن هستند.

یکی از راه‌های بهبود کارآیی مصرف کودهای نیتروژنه و کاهش تلفات آن، مصرف همزمان کودهای آلی و زیستی با کودهای شیمیایی است. کودهای آلی قادرند علاوه‌بر تأمین بخشی از مواد غذایی مورد نیاز گیاه (Turgut et al., 2005) سبب بهبود رشد و عملکرد گیاه شوند (Kramer et al., 2002). کود دامی حاوی مقادیر قابل‌توجهی عناصر غذایی است که حفظ این عناصر غذایی از هنگام تولید تا زیر خاک بردن آن‌ها، هم از جهت زیست‌محیطی (Moradi & Aminian, 2012) و هم از جهت اقتصادی مهم است. کاربرد کودهای آلی در نظام‌های زراعی می‌تواند ماده آلی خاک را افزایش دهد که خود ممکن است سبب افزایش کارآیی مصرف نیتروژن برای گیاهان زراعی شود (Kamkar et al., 2011). به‌منظور حل این

1- Nitrogen Use Efficiency, NUE

مشکل، ایجاد شرایطی برای حفظ نیتروژن در لایه سطحی خاک، استفاده از کودهای کنترل‌رهش (کنترل‌کننده رهایش) (Gentile et al., 2009) و یا افزایش سطوح جاذب املاح در خاک (Moradi & Aminian, 2012) مورد توجه پژوهش‌گران می‌باشد. چگونگی تأثیر کودهای کنترل‌رهش[1] بر کاهش آبشویی در شرایط آبشویی شدید به‌خوبی شناخته شده نیست، ولی استفاده از بایوچار به‌عنوان افزایش دهنده سطوح جاذب می‌تواند نقش به‌سزایی در این زمینه ایفا کند (Hollister et al., 2013; Zhang et al., 2014).

بایوچار ماده جامد سیاه‌رنگ غنی از کربن پایدار می‌باشد که در نتیجه سوزاندن مواد آلی در شرایط بدون اکسیژن و یا اکسیژن کم، در دمای کمتر از ۷۰۰ درجه سلسیوس تولید می‌شود (Lehmann et al., 2003). افزودن بایوچار به خاک به‌دلیل داشتن کربن آلی و عناصر غذایی مورد نیاز گیاه باعث بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی خاک (Busscher et al., 2007) و در پی آن، منجر به افزایش تولید محصول می‌شود (Lehmann, 2007). بایوچار نسبت به سایر مواد آلی خاک دارای سطح ویژه و بار منفی بیش‌تری می‌باشد که منجر به ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) زیاد و افزایش جذب و نگه‌داری انواع ترکیب‌های آلی و معدنی می‌شود (Liang et al., 2006)، به‌طوری که مطالعات نشان می‌دهد بایوچار می‌تواند CEC را تا ۵۰ درصد افزایش (Lehmann et al., 2003) و با افزایش CEC خاک از شستشوی عناصر غذایی جلوگیری کرده و فراهمی آن‌ها را برای گیاه افزایش دهد. بایوچار با تأثیر مثبت بر کارایی مصرف منابع و نهاده-های کشاورزی و عملکرد گیاهان زراعی به‌دلیل چگالی سطحی بالا در بهبود کارایی تولیدات زراعی (Chan et al., 2008) و کاهش هدررفت نیتروژن (دنیتریفیکاسیون) و در نتیجه، جذب بیشتر نیتروژن تأثیر به‌سزایی دارد (Van Zwieten et al., 2009). تحقیقات نشان می‌دهد که با افزودن بایوچار در مقادیر زیاد (۱۰ یا ۲۰ درصد جرمی) به خاک، می‌توان به‌طور مؤثر از آبشویی یون‌هایی مانند آمونیوم از خاک جلوگیری کرد، امّا این اثر، به نوع بایوچار و خاک و هم‌چنین زمان تماس آن دو بستگی دارد (Lehmann et al., 2003). در تحقیقی، تأثیر بایوچار بر خصوصیات خاک و جذب عناصر غذایی توسط کاهو را مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد، بایوچار موجب افزایش pH، قابلیت هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل دسترس، ظرفیت تبادل کاتیونی و بازهای تبادلی می‌گردد (Nigussie, 2012).

بایوچار، همانند دیگر اصلاح‌کننده‌های آلی خاک، با تغییر شرایط فیزیکی و فرآیندهای شیمیایی خاک (Herath et al., 2013; Eastman, 2011) موجب بهبود خصوصیات و رفتارهای جانداران خاک (Mastoet et al., 2013) و در نتیجه، بهتر شدن و رشد و عمل‌کرد گیاه می‌شود (Paz-Ferreiro et al., 2014)، تحقیقات مختلف نشان داده است که افزودن بایوچار به خاک باعث بهبود فعالیت میکروبی خاک می‌شود (Pietikainen et al., 2000; Krull et al., 2009). بایوچار به‌عنوان ماده‌ی اضافه‌شده به خاک، توانایی تحریک ریزجانداران مفید و بهبود فعالیت میکروبی خاک را داراست - (Warnock et al., 2007; Lehmann & Joseph, 2009)، سطوح بایوچار به‌علت جذب عناصر غذایی می‌تواند محیط مناسبی برای ریزجانداران خاک‌زی باشد (Pietikainen et al., 2000).

کودهای زیستی، کودهای طبیعی هستند که شامل باکتری‌ها (*آزوسپیریلوم* و *ازتوباکتر*)، قارچ‌ها (میکوریزا)، جلبک‌ها (جلبک‌های سبز- آبی) و غیره می‌باشند که نقش مهمی را در تغذیه گیاه و سلامت خاک بر عهده دارند (Board, 2004). از جمله این کودهای زیستی، باکتری‌های *آزوسپیریلوم* می‌باشند که به‌دلیل پراکنش وسیع جغرافیایی، گستردگی دامنه گیاهان میزبان و به‌ویژه توان برقراری ارتباط هم‌یاری با گیاهان مهم زراعی مانند برنج و گندم توجه بیشتری را به خود جلب نموده است (Bashan & Holguin, 1997). نتایج بسیاری از مطالعه‌ها نشان می‌دهد که حضور باکتری در ریزوسفر و اندوریزوسفر گیاه میزبان، آثار معنی‌داری در بهبود شاخص‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه و در نتیجه، ازدیاد محصول پدید می‌آورد (Egamberdiyeva et al., 2004). مطالعات نشان داده که باکتری‌های محرک رشد به‌طور مستقیم از طریق تثبیت بیولوژیک نیتروژن، تولید هورمون‌های رشد (Pedraza et al.,2009) و افزایش میزان جذب و دسترسی به مواد غذایی (Turan et al., 2006) مؤثر می‌باشند و حتی به‌عنوان مکمل و جایگزین کودهای شیمیایی شناخته می‌شوند (Nezarat & Gholami, 2009; Eidizadeh et al., 2010).

نیتراته‌شدن آب‌های زیرزمینی به‌دلیل مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی و آبشویی بالای کودهای نیتروژنه و همچنین پایین بودن کارایی مصرف نیتروژن در آبیاری غرقابی برنج، بیان‌گر نیاز مبرم به سایر روش‌های مدیریتی در زراعت برنج اعم از تغییر روش آبیاری و

1- Controlled-release fertilizers

استفاده از کودهای آلی و زیستی است. استفاده از کود بایوچار به‌همراه باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن در کشت با تناوب آبیاری برنج می‌تواند راهکار مناسبی برای کاهش مشکلات ذکر شده باشد. لذا، پژوهش حاضر با هدف بررسی شاخص‌های کارایی کود نیتروژن در دو شیوه آبیاری غرقاب و تناوبی همراه با سطوح بایوچار و کود نیتروژن و تلقیح با باکتری *آزوسپیریلوم لیپوفروم* انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۱۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۱ متر پایین‌تر از سطح دریا، در سال زراعی ۱۳۹۶، به‌صورت کرت‌های دو بارخرد شده[1] در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. رقم مورد استفاده در این پژوهش، برنج هاشمی بود. عامل اصلی، شیوه آبیاری در دو سطح آبیاری غرقاب و آبیاری تناوبی و عامل فرعی تیمار کودی در نه سطح، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه شده (به‌میزان به‌ترتیب ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره به‌صورت سرک در سه مرحله به خاک داده شد) بر اساس آزمون خاک (جدول ۱) به‌همراه صفر، ۱۰ و ۲۰ تن بایوچار در هکتار بود، عامل فرعی-فرعی نیز جدایه خالص باکتری *آزوسپریلوم لیپوفروم*[2] (مایه تلقیحی میکروبی با غلظت نهایی 10^9 CFU ml^{-1}) که از مؤسسه تحقیقات خاک و آب کرج تهیه شد، در دو سطح بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی با گیاهچه بود. همچنین یک کرت بدون مصرف نیتروژن برای محاسبه شاخص‌های کارایی نیتروژن در کنار طرح آزمایشی در نظر گرفته شد.

روش تهیه بایوچار

برای تولید بایوچار از روش تجزیه حرارتی استوانه‌ای استفاده شد (Lehmann & Joseph, 2009). در ابتدا برای تولید بایوچار مواد اولیه سلولزی شامل بقایای چوب و گیاهان زراعی تهیه و دسته‌بندی شدند. سپس جهت تبدیل مواد سلولزی به کربن در شرایط بی‌هوازی، مواد سلولزی ابتدا در درجه حرارت ۱۱۰ درجه سلسیوس جهت تبخیر آب موجود به‌مدت دو ساعت قرار گرفتند. سپس به‌مدت سه ساعت در درجه حرارت ۲۸۰ درجه سلسیوس برای بیرون رفتن مواد فرار قرار داده شدند. واکنش بعدی که مرحله کربونیزاسیون و تشکیل شبکه متخلخل بود، گرمازا بود که دو ساعت به‌طول انجامید و در گام پایانی کربن‌های تولید شده به دمای محیط رسیدند (Lehmann & Joseph, 2009) (جدول ۲).

در اواخر اردیبهشت ماه، عملیات کامل شخم بهاره، ماله‌کشی و تسطیح زمین انجام گردید و همزمان با آماده سازی زمین و پیش از نشاکاری، کود بایوچار، اوره، سوپرفسفات تریپل (۵۰ کیلوگرم در هکتار) و سولفات پتاسیم (۷۵ کیلوگرم در هکتار) بر اساس آزمون خاک (جدول ۱) به خاک اضافه و خوب مخلوط شدند (Malekotti, 2000). برای اطمینان از عدم ترکیب آب کرت‌ها با هم و همچنین برای جلوگیری از نشت آب، کود و باکتری‌ها، مرز کرت‌ها تا عمق ۵۰ سانتی‌متری پوشش نایلونی کشیده و مرزبندی شد. سپس برای تکرار-های با آبیاری تناوبی از روش ایری (Nie et al, 2011) استفاده گردید. در این روش، در لوله‌های پی‌وی‌سی به ارتفاع ۲۰ و قطر پنج سانتی‌متر، با مته برقی سوراخ‌های زیاد ایجاد شد و لوله‌ها برای نفوذ آب به درون لوله، به‌صورت مشبک درآمدند و در کرت‌ها مستقر شدند. لوله‌ها به‌صورت روزانه بازبینی و در صورت نیاز، آبیاری انجام شد. برای مایه‌زنی باکتری، ریشه گیاهچه‌ها در مرحله سه تا چهار برگی در یک لیتر باکتری *آزوسپریلوم لیپوفروم* به‌همراه ۱۵ گرم از ماده کربوکسی‌متیل‌سلولز (CMC) برای افزایش چسبندگی (Khorramjah, 2015) به‌مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شدند. تعداد گیاهچه در هر کپه دو عدد و فاصله هر گیاهچه از گیاهچه‌های مجاور از هر سمت ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. مبارزه با آفات و علف-های هرز به‌صورت مکانیکی و یا دستی صورت گرفت و در طی انجام طرح کشاورزی هیچ‌گونه علف‌کش و یا سمومی استفاده نشد. در این پژوهش اجزای متفاوت کارایی نیتروژن به صورت زیر محاسبه شدند:

عملکرد عامل بهره‌وری نسبی نیتروژن (PFP_N)

$$PFP_N = GY_{+N}/FN \quad \text{(1)}$$

کارایی زراعی کود نیتروژن (AE)

$$AE_N = (GY_{+N}-GY_{0N})/FN \quad \text{(2)}$$

کارایی بازیافت کود نیتروژن (RE)

$$RE_N = (UN_{+N} - UN_{0N})/FN \quad \text{(3)}$$

کارایی فیزیولوژیک کود نیتروژن (PE)

$$PE_N = (GY_{+N} - GY_{0N})/(UN_{+N} - UN_{0N}) \quad \text{(4)}$$

کارایی داخلی کود نیتروژن (IE)

1- Split split plot
2- *A. lipoferum*

$$IE_N = GY/UN$$ معادله (۵)

که در این معادله‌ها، GY_{+N}: عملکرد دانه در تیمار با مصرف کـود (کیلوگرم در هکتار)، GY_{0N}: عملکرد دانه در تیمار عدم کـاربرد کـود، UN_{+N} و UN_{0N}: به‌ترتیب میزان جذب کل نیتـروژن در زیسـت‌تـوده اندام‌های هوایی در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک در کرت‌هایی که کود نیتروژن دریافت کرده‌اند و کرت بدون مصرف کود نیتروژن بر حسـب کیلوگرم در هکتار، FN: مقدار کود نیتروژن مصرف شده (کیلـوگرم در هکتار) می‌باشند. در کارایی داخلی،GY: عملکـرد دانـه هـر تیمـار بـر حسب کیلوگرم در هکتـار و UN: جـذب کـل نیتـروژن (کیلـوگرم در هکتار) برای هر تیمار هستند (Dobermann & Fairhurst, 2000)

جدول ۱- برخی از خصوصیات خاک مزرعه محل اجرای آزمایش

Table 1- Some soil charactristics at the studied field

شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	بافت Texture	کربن آلی Organic C	ماده آلی Organic matter	اسیدیته اشباع saturated acidity	هدایت الکتریکی (EC)	نیتروژن (N)	فسفر قابل جذب P	پتاسیم قابل جذب K
	(%)			(%)			(dS.m^{-1})	(%)	(Mg.kg^{-1})	
41	28	31	لومی رسی (loam clay)	1.96	3.39	8.4	0.6	0.19	5	186

جدول ۲- ویژگی‌های بایوچار مورد استفاده

Table 2- Biochar properties used

دانه بندی Grading	نیتروژن N (g.kg^{-1})	درصد کربن C (%)	درصد خاکستر Ash (%)	pH	محتوای رطوبت Moisture content (%)	عدد متیلن بلو Methylene blue number (mg.g^{-1})	مساحت سطح بر اساس استاندارد ASTM Surface area according to standard ASTM (m^2.g^{-1})	عدد ید Iodine number (mg.g^{-1})	ویژگی‌های بایوچار Biochar properties
0.1≥	18-20	48-50	4-5	5.8	3-4	150-250	950-1100	950-1100	

همچنین شاخص برداشت نیتروژن، غلظت نیتروژن دانه و غلظت پروتئین دانه از معادله‌های زیر حاصل شد (Huggins et al., 1993).

شاخص برداشت نیتروژن (HI)

$$HI_N = (Ng/Nt) \times 100$$ معادله (۶)

غلظت نیتروژن دانه (GNS)

$$GNC= (Ng/GY) \times 100$$ معادله (۷)

غلظت پروتئین دانه (GPC)

$$GPC = GNC \times 5.7$$ معادله (۸)

که در این معادله‌ها، Ng: نیتروزن دانه، Nt: نیتروژن کل گیـاه و GY: عملکرد دانه می‌باشند.

تجزیه داده‌ها، به‌صورت آنالیز واریـانس طـرح کـرت‌هـای دو بـار خردشده و با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۲ انجام شد. آزمون F برای هر منبع تغییر، بر مبنای امید ریاضی میـانگین مربعـات (EMS) انجام شد. در صورت معنی‌دار بودن اثر F در جـدول آنـالیز واریـانس، اقدام به مقایسه میانگین‌هـا، بـا اسـتفاده از آزمـون LSD شـد. بـرای مقایسه میانگین اثرات متقابل، برش (Slice) بر مبنای شـیوه آبیـاری انجام گرفت. سطح خطا برای مقایسه میانگین برای تمام صفات پـنج درصد در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

نیتروژن و پروتئین دانه

میزان نیتروژن و پروتئین دانه تحت تأثیر تیمارهای کود، باکتری، شیوه آبیاری و همچنین اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه آن‌ها در سطح احتمال یک درصد قرار گرفتند (جدول ۳).

مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه داده‌ها نشـان مـی‌دهـد، در آبیاری غرقابی بیشترین درصـد نیتـروژن (۲/۱۵) و پـروتئین (۱۲/۲۷) دانه با مصرف ۲۰ تن بایوچار در هکتار + ۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه-شـده و کـاربرد بـاکتری حاصـل و کمتـرین درصـد نیتـروژن (۰/۵) و

پروتئین (۲/۸۳) دانه در شاهد ۵۰ درصد نیتروژن مشاهده شد (جدول ۴). همچنین در شیوه آبیاری تناوبی تیمار ۲۰ تن بایوچار + ۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه شده، بیشترین درصد نیتروژن (۲/۲) و پروتئین (۱۲/۵۴) دانه را موجب شد. کمترین درصد نیتروژن (۰/۳۸) و پروتئین (۲/۱۴) دانه در آبیاری تناوبی، در شاهد ۵۰ درصد نیتروژن توصیه شده به‌دست آمد (جدول ۵).

همان‌طور که مشاهده می‌شود کاربرد ۲۰ تن بایوچار به‌همراه ۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه شده (همراه با مصرف باکتری در غرقاب و بدون مصرف باکتری در تناوبی) توانست موجب افزایش ۱/۶۵ درصدی نیتروژن و ۹/۴۴ درصدی پروتئین دانه در روش آبیاری غرقابی و ۱/۸۲ درصدی نیتروژن و ۱۰/۴ درصدی پروتئین دانه در روش آبیاری تناوبی شود.

نیتروژن در زیست‌توده گیاهی به‌شکل اسیدهای آمینه، آمین و قندهای آمینه می‌باشد و هنگامی که زیست‌توده گیاهی برای تولید بایوچار تحت عمل پرولیز قرار می‌گیرد، میزان زیادی از این ساختارهای هتروسیکلیک نیتروژن به‌فرم فشرده تبدیل شده (Cao & Harris, 2010; Koutcheiko et al., 2006) که ممکن است برای گیاه قابل دسترس نباشد (Gaskin et al., 2010) در نتیجه، مقداری از نیتروژن باقی‌مانده که به‌فرم فشرده درنیامده در بایوچار برای گیاه قابل دسترس می‌باشد (Ca & Harris, 2010; Novak et al., 2009). تحقیقات نشان می‌دهد که با افزودن بایوچار در مقادیر زیاد (۱۰یا ۲۰ درصد جرمی) به خاک، می‌توان به‌طور مؤثر از آب‌شویی یون‌هایی مانند آمونیوم از خاک جلوگیری کرد، امّا این اثر، به نوع بایوچار و خاک و همچنین مدت زمان تماس بایوچار و خاک بستگی دارد (Lehmann et al., 2003). در بررسی‌های چان و همکاران (Chan et al., 2008) گزارش شد که در هنگام مصرف بایوچار به‌همراه کود نیتروژنه بر میزان نیتروژن گیاه اثر مثبتی مشاهده شد. هم‌چنین نتایج مشابهی توسط استاینر و همکاران (Steiner et al., 2008) گزارش شد. بنابراین، بایوچار دارای پتانسیل بالایی در بهره‌وری بهتر از عناصر معدنی و کود نیتروژن می‌باشد و می‌تواند موجب افزایش جذب نیتروژن توسط گیاه گردد.

در آبیاری غرقاب بیشترین درصد نیتروژن و پروتئین دانه همراه با مصرف باکتری به‌دست آمد. مصرف تلفیقی کودهای شیمیایی، آلی و زیستی به‌دلیل فراهمی نیتروژن در مرحله زایشی سبب افزایش محتوای نیتروژن دانه می‌شود، به‌طوری‌که در مرحله زایشی، نیتروژن موجود در ساقه و برگ به‌سرعت به‌سمت خوشه و دانه‌های در حال نمو حرکت می‌کنند. در بررسی‌های (Pedraza et al., 2009) عنوان شد که بالاترین مقدار نیتروژن دانه زمانی حاصل شد که از تلقیح بذور با باکتری *آزوسپیریلوم* استفاده گردید. این محققان، دلیل این افزایش را، قابلیت دسترسی بیشتر به عناصر غذایی توسط باکتری *آزوسپیریلوم* دانستند. از طرفی دیگر، همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شرایط آبیاری تناوبی به‌دلیل خشک شدن متوالی زمین شرایط مساعد برای رشد فعالیت باکتری مهیا نبوده و باکتری نتوانسته تأثیر مثبتی بر میزان جذب نیتروژن و افزایش پروتئین دانه برنج داشته باشد. مقدار رطوبت موجود در خاک از عوامل مؤثر بر مقدار تثبیت نیتروژن توسط باکتری است. نقش اولیه کمبود رطوبت خاک به کاهش تولید آسیمیلات و انتقال آن به ریشه و نقش ثانویه آن به اثر مستقیم بر باکتری‌های همزیست موجود در ریشه برمی‌گردد (Peoples et al., 2002). قدرت ارتباط گیاه با باکتری از عوامل تعیین‌کننده در مقدار تثبیت نیتروژن توسط باکتری است. عوامل محیطی در این امر نقش به‌سزایی دارند و تنش‌های محیطی می‌توانند باعث کاهش همزیستی و فعالیت باکتری شوند (Unkovich & Pate, 2000).

میزان جذب نیتروژن دانه، کاه و کل گیاه

بررسی داده‌های مربوط به تجزیه واریانس نشان داد که تمامی اثرات ساده و متقابل تیمارهای اعمال شده به‌غیر از اثر متقابل شیوه آبیاری و باکتری در سطح احتمال یک درصد بر میزان جذب نیتروژن در دانه و کل گیاه معنی‌دار بود. اثر متقابل شیوه آبیاری و کود نیز در سطح احتمال پنج درصد بر میزان جذب نیتروژن کاه معنی‌دار بود (جدول ۳)

مطابق جداول ۴ و ۵ در بررسی اثر متقابل سه‌گانه آبیاری × کود × باکتری مشخص شد که در آبیاری غرقاب بیشترین (۱۰۲/۸۴ کیلوگرم در هکتار) جذب نیتروژن دانه با مصرف ۲۰ تن بایوچار و ۷۵ درصد از نیتروژن توصیه شده همراه با مصرف باکتری به‌دست آمد و کمترین (۱۲/۸۷ کیلوگرم در هکتار) جذب نیتروژن دانه در شاهد ۵۰ درصد نیتروژن مشاهده شد.

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر بایوچار،کود نیتروژن و باکتری *آزوسپیریلوم لیپوفروم* بر شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن گیاه برنج در شرایط آبیاری متناوب و غرقاب

Table 3- Analysis of variance of the effect of biochar, nitrogen fertilizer and *Azospirillum lipofrom* bacteria on nitrogen use efficiency indices of rice plant in intermittent and flooded irrigation conditions

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squares										
		جذب نیتروژن کل Total N uptake (kg.ha^{-1})	جذب نیتروژن دانه Grain N uptake (kg.ha^{-1})	جذب نیتروژن کاه Straw N uptake (kg.ha^{-1})	بهره‌وری نسبی نیتروژن PFP_N (kg.kg^{-1})	کارایی زراعی کود نیتروژن AE_N (kg.kg^{-1})	کارایی بازیافت کود نیتروژن RE_N (kg.kg^{-1})	کارایی فیزیولوژیکی کود نیتروژنPE_N (kg.kg^{-1})	کارایی داخلی کود نیتروژن IE_N (kg.kg^{-1})	شاخص برداشت نیتروژن NHI (%)	نیتروژن دانه Grain N (%)	پروتیین دانه Grain protein (%)
بلوک Block	2	30.46^{ns}	28.51^{ns}	3.21^{ns}	14.81^{ns}	14.81^{ns}	0.009^{ns}	114.62^{ns}	45.77^{ns}	5.99^{ns}	0.006^{ns}	0.21^{ns}
شیوه آبیاری Irrigation method	1	4855.32**	3458.21**	112.04**	4379.85**	9.58^{ns}	0.416**	8737.48*	1963.85*	178.74*	0.179**	5.8**
خطای a Error a	2	16.12	16.49	0.003	37.01	37.01	0.003	148.23	34.97	6.35	0.002	0.05
کود Fertilizer	8	12611.87**	6974.26**	971.88**	4464.07**	2079.05**	1.443**	8211.1**	8237.18**	324.17**	2.111**	68.57**
شیوه آبیاری × کود Irrigation method× fertilizer	8	503.09**	490.45**	9.52*	309.06**	149.41**	0.141**	2029.08**	1563.83**	109.27**	0.189**	6.15**
خطای b Error b	32	24.35	16.75	3.37	37.07	37.07	0.005	113.21	38.89	7.81	0.004	0.14
باکتری Bactria	1	14879.94**	6853.35**	1559.23**	703.53**	703.53**	3.392**	43568.4**	37733.3**	15.61^{ns}	3.977**	129.21**
شیوه آبیاری × باکتری Irrigation method× bactria	1	71.98^{ns}	21.83^{ns}	180.76**	46.85^{ns}	46.85^{ns}	0.001^{ns}	5200.2**	2267.57**	610.36**	0.285**	9.27**
کود × باکتری Fertilizer× bactria	8	436.48**	490.95**	103.18**	708.86**	708.86**	0.17**	4055.6**	1861.59**	234.99**	0.161**	5.24**
شیوه آبیاری × کود × باکتری Irrigation method× fertilizer× bactria	8	781.01**	742.23**	14.52**	283.26**	283.26**	0.135**	1480.53**	1399. 99**	157.07**	0.241**	7.83**
خطای آزمایش Error	36	23.98	20.04	3.94	21.86	21.86	0.005	93.96	32.61	6.14	0.002	0.05
ضریب تغییرات (درصد) C.V		7.76	9.17	13.96	8.06	14.04	10.27	15.11	7.07	3.22	3.39	3.39

* و **: به‌ترتیب نشان دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد و ns بیانگر غیرمعنی‌داری است

* and **: significant at 5 and 1% levels of probability, respectively; ns: not significan

جدول ٤- مقایسه میانگین برهم‌کنش اثر سطوح کودی و باکتری *آزوسپیریلوم لیپوفروم* در شیوه آبیاری غرقاب بر شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن گیاه برنج

Table 4- Mean comparison of the interaction effect of fertilizer levels and *Azospirillium lipofrom* bacteria in flood irrigation method on nitrogen use efficiency indices of rice plants

کود Fertilizer	باکتری Bacteria	جذب نیتروژن کل Total N uptake ($kg.ha^{-1}$)	جذب نیتروژن دانه Grain N uptake ($kg.ha^{-1}$)	جذب نیتروژن کاه Straw N uptake ($kg.ha^{-1}$)	بهره‌وری نسبی نیتروژن PFP_N ($kg.kg^{-1}$)	کارایی زراعی کود نیتروژن AE_N ($kg.kg^{-1}$)	کارایی بازیافت کود نیتروژن RE_N ($kg.kg^{-1}$)	کارایی فیزیولوژیکی کود نیتروژن PE_N ($kg.kg^{-1}$)	کارایی داخلی کود نیتروژن IE_N ($kg.kg^{-1}$)	شاخص برداشت نیتروژن NHI (%)	نیتروژن دانه Grain N (%)	پروتیین دانه Grain protein (%)
نیتروژن۱۰۰+بایوچار۰ Nitrogen 100+ 0 biochar	بدون باکتری No bacteria	27.48^{h}	22.11^{k}	5.37^{ij}	25.94^{j}	4.23^{k}	0.06^{j}	70.18^{d}	124.46^{b}	80.52^{de}	0.77^{i}	4.38^{i}
	با باکتری With bacteria	63.05^{e}	48.03^{gh}	15.03^{e}	49.22^{hi}	27.51^{gh}	0.48^{h}	56.9^{de}	78.02^{d}	76.08^{f}	1.26^{ef}	7.21^{ef}
نیتروژن۱۰۰+بایوچار۱۰ Nitrogen 100+ 10 biochar	بدون باکتری No bacteria	46.36^{f}	33.14^{j}	13.22^{ef}	31.04^{j}	9.33^{jk}	0.32^{i}	29.21^{ghi}	66.9^{ef}	71.52^{gh}	1.07^{g}	6.1^{g}
	با باکتری With bacteria	79.85^{c}	53.96^{fg}	25.89^{c}	48.11^{hi}	26.4^{gh}	0.65^{g}	40.5^{efgh}	60.23^{fgh}	67.56^{h}	1.12^{g}	6.39^{g}
نیتروژن۱۰۰+بایوچار۲۰ Nitrogen 100+ 20 biochar	بدون باکتری No bacteria	117.13^{b}	89.92^{b}	27.21^{c}	49.33^{hi}	27.62^{gh}	1.02^{cd}	26.94^{hi}	42.08^{i}	76.72^{ef}	1.82^{b}	10.4^{b}
	با باکتری With bacteria	137.54^{a}	94.32^{b}	43.22^{a}	43.76^{i}	22.05^{hi}	1.23^{b}	17.91^{i}	31.8^{j}	68.47^{h}	2.15^{a}	12.27^{a}
نیتروژن۷۵+بایوچار۰ Nitrogen 75+ 0 biochar	بدون باکتری No bacteria	35.93^{g}	31.42^{j}	4.51^{j}	54.28^{gh}	25.33^{gh}	0.28^{i}	90.86^{c}	113.85^{c}	84.98^{b}	0.61^{jk}	3.45^{jk}
	با باکتری With bacteria	48.75^{f}	41.61^{hi}	7.14^{hij}	43.99^{i}	15.04^{ij}	0.45^{h}	32.6^{ghi}	67.56^{ef}	83.37^{bc}	1.28^{ef}	7.32^{ef}
نیتروژن۷۵+بایوچار۱۰ Nitrogen 75+ 10 biochar	بدون باکتری No bacteria	76.98^{cd}	67.58^{cd}	9.4^{gh}	72.8^{f}	43.85^{cd}	0.83^{ef}	52.92^{ef}	71de	87.84^{ab}	1.24^{f}	7.06^{f}
	با باکتری With bacteria	76.71^{cd}	57.29^{ef}	19.41^{d}	56.85^{gh}	27.9^{gh}	0.82^{ef}	33.64^{ghi}	55.62^{gh}	74.72^{fg}	1.34^{de}	7.66^{de}
نیتروژن۷۵+بایوچار۲۰ Nitrogen 75+ 20 biochar	بدون باکتری No bacteria	84.66^{c}	74.22^{c}	10.44^{fg}	62.8^{g}	33.85^{efg}	0.93^{de}	36.38^{fgh}	55.69^{gh}	87.68^{ab}	1.58^{c}	8.99^{c}
	با باکتری With bacteria	134.62^{a}	102.84^{a}	31.78^{b}	78.98^{def}	50.04^{bc}	1.6^{a}	31.34^{ghi}	44.02^{i}	76.43^{ef}	1.74^{b}	9.9^{b}
نیتروژن۵۰+بایوچار۰ Nitrogen 50+ 0 biochar	بدون باکتری No bacteria	20.9^{h}	12.87^{l}	7.02^{hij}	73.42^{ef}	30^{fgh}	0.25^{i}	117.5^{b}	133.37^{b}	61.87^{i}	0.5^{l}	2.83^{l}
	با باکتری With bacteria	69.9^{de}	59.32^{ef}	10.58^{fg}	92.26^{bc}	48.84^{bc}	1.1^{c}	44.19^{efg}	66.02^{ef}	84.8^{bc}	0.98^{h}	5.57^{h}
نیتروژن۵۰+بایوچار۱۰ Nitrogen 50+ 10 biochar	بدون باکتری No bacteria	76.95^{cd}	69^{cd}	7.94^{ghi}	98.59^{b}	55.17^{b}	1.24^{b}	44.41^{efg}	64.11^{efg}	89.61^{a}	1.4^{d}	7.98^{d}
	با باکتری With bacteria	77.35^{cd}	63.13^{de}	14.22^{e}	84.58^{cd}	41.16^{cde}	1.25^{b}	32.86^{ghi}	54.64^{h}	81.6^{cd}	1.49^{c}	8.52^{c}
نیتروژن۵۰+بایوچار۲۰ Nitrogen 50+ 20 biochar	بدون باکتری No bacteria	28.77^{gh}	22.6^{k}	6.17^{ij}	82.25^{de}	38.83^{def}	0.28^{i}	146.25^{a}	144.58^{a}	78.53^{def}	0.6^{k}	3.42^{k}
	با باکتری With bacteria	53.35^{f}	37.66^{ij}	15.69^{e}	110.48^{a}	67.06^{a}	0.77^{f}	88.06^{c}	104.16^{c}	70.7^{gh}	0.68^{ij}	3.89^{ij}

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون، نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد است.

Means with similar letters in each column, are not significantly different at $P<0.05$ level of probability.

جدول ۵- مقایسه میانگین برهم‌کنش اثر سطوح کودی و باکتری *آزوسپریلیوم لیپوفروم* در شیوه آبیاری تناوبی بر شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن گیاه برنج

Table 5 - Mean comparison of the interaction effect of fertilizer levels and *Azospirillium lipofrom* bacteria in intermittent irrigation method on nitrogen use efficiency indices of rice plants

کود Fertilizer	باکتری Bacteria	جذب نیتروژن کل Total N uptake ($kg.ha^{-1}$)	جذب نیتروژن دانه Grain N uptake ($kg.ha^{-1}$)	جذب نیتروژن کاه Straw N uptake ($kg.ha^{-1}$)	بهره‌وری نسبی نیتروژن PFP_N ($kg.kg^{-1}$)	کارایی زراعی کود نیتروژن AE_N ($kg.kg^{-1}$)	کارایی بازیافت کود نیتروژن RE_N ($kg.kg^{-1}$)	کارایی فیزیولوژیک کود نیتروژن PE_N ($kg.kg^{-1}$)	کارایی داخلی کود نیتروژن IE_N ($kg.kg^{-1}$)	شاخص برداشت نیتروژن NHI (%)	نیتروژن دانه Grain N (%)	پروتیین دانه Grain protein (%)
نیتروژن۱۰۰+بایوچار۰ Nitrogen 100+ 0 biochar	بدون باکتری No bacteria	38.77^{hi}	26.75^{fg}	12.02^{ef}	23.12^{j}	10.64^{i}	0.3^{fg}	34.93^{hi}	59.65^{fgh}	68.19^{fg}	1.16^{g}	6.58^{g}
	با باکتری With bacteria	36.5^{ij}	29.29^{f}	7.2^{hi}	30.93^{hi}	18.45^{h}	0.28^{fg}	65.64^{de}	84.98^{d}	80.17^{de}	0.94^{i}	5.38^{i}
نیتروژن۱۰۰+بایوچار۱۰ Nitrogen 100+ 10 biochar	بدون باکتری No bacteria	45.93^{gh}	31.77^{f}	14.17^{cde}	39.1^{gh}	26.62^{gh}	0.38^{ef}	71^{d}	85.17^{d}	69.17^{fg}	0.81^{j}	4.63^{j}
	با باکتری With bacteria	69.67^{e}	54.17^{d}	15.5^{cd}	38.13^{gh}	25.65^{gh}	0.61^{d}	41.66^{ghi}	54.63^{gh}	77.73^{e}	1.42^{e}	8.12^{e}
نیتروژن۱۰۰+بایوچار۲۰ Nitrogen 100+ 20 biochar	بدون باکتری No bacteria	138.09^{a}	110.73^{a}	27.36^{b}	50.33^{ef}	37.85^{de}	1.3^{a}	29.24^{i}	36.5^{i}	80.19^{de}	2.2^{a}	12.54^{a}
	با باکتری With bacteria	128.88^{b}	88.47^{b}	40.41^{a}	45.28^{fg}	32.8^{efg}	1.2^{a}	27.25^{i}	35.19^{i}	68.73^{fg}	1.95^{b}	11.13^{b}
نیتروژن۷۵+بایوچار۰ Nitrogen 75+ 0 biochar	بدون باکتری No bacteria	20.01^{l}	17.04^{hi}	2.97^{j}	45^{fg}	28.36^{fg}	0.15^{hi}	183.52^{a}	168.72^{a}	85.25^{bc}	0.51^{kl}	2.88^{kl}
	با باکتری With bacteria	25.14^{kl}	20.62^{gh}	4.52^{ij}	25.76^{ij}	9.12^{i}	0.22^{gh}	40.04^{ghi}	76.77^{de}	81.79^{cde}	1.07^{h}	6.07^{h}
نیتروژن۷۵+بایوچار۱۰ Nitrogen 75+ 10 biochar	بدون باکتری No bacteria	22.88^{kl}	12.78^{ij}	10.1^{fgh}	45.02^{fg}	28.38^{fg}	0.19^{gh}	149.39^{b}	148.51^{b}	55.51^{h}	0.51^{kl}	2.9^{kl}
	با باکتری With bacteria	83.66^{d}	70^{c}	13.66^{de}	58.33^{de}	41.69^{cde}	1^{b}	41.56^{ghi}	52.33^{h}	83.55^{bcd}	1.6^{d}	9.11^{d}
نیتروژن۷۵+بایوچار۲۰ Nitrogen 75+ 20 biochar	بدون باکتری No bacteria	79.27^{d}	68.92^{c}	10.35^{fgh}	72.54^{bc}	55.9^{b}	0.94^{b}	59.17^{def}	68.64^{ef}	86.94^{ab}	1.27^{f}	7.22^{f}
	با باکتری With bacteria	99.06^{c}	72.3^{c}	26.76^{b}	53.48^{ef}	36.84^{def}	1.21^{a}	30.44^{i}	40.46^{i}	72.94^{f}	1.8^{c}	10.28^{c}
نیتروژن۵۰+بایوچار۰ Nitrogen 50+ 0 biochar	بدون باکتری No bacteria	11.65^{m}	8.37^{j}	3.28^{j}	32.96^{hi}	8^{i}	0.06^{i}	122^{c}	141.35^{b}	71.84^{f}	0.38^{m}	2.14^{m}
	با باکتری With bacteria	49.45^{fg}	45.04^{e}	4.41^{ij}	67.59^{bc}	42.63^{cd}	0.82^{c}	51.9^{efg}	68.45^{ef}	91.14^{a}	1.33^{f}	7.59^{f}
نیتروژن۵۰+بایوچار۱۰ Nitrogen 50+ 10 biochar	بدون باکتری No bacteria	29.75^{jk}	21.08^{gh}	8.67^{gh}	75.15^{b}	50.19^{bc}	0.43^{e}	118.11^{c}	126.59^{c}	70.82^{fg}	0.57^{k}	3.23^{k}
	با باکتری With bacteria	55.86^{f}	44.11^{e}	11.75^{efg}	70.64^{bc}	45.68^{cd}	0.95^{b}	48.68^{fgh}	63.85^{fg}	78.97^{e}	1.25^{f}	7.11^{f}
نیتروژن۵۰+بایوچار۲۰ Nitrogen 50+ 20 biochar	بدون باکتری No bacteria	22.8^{kl}	15.48^{hi}	7.31^{hi}	64.44^{cd}	39.48^{de}	0.29^{fg}	134.09^{bc}	140.13^{b}	71.12^{f}	0.48^{l}	2.73^{l}
	با باکتری With bacteria	57.53f	40.4e	17.13c	91.62a	66.66a	0.98b	67.84de	79.68d	70.35fg	0.88ij	5.03ij

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون، نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد است.

Means with similar letters in each column, are not significantly different at $P<0.05$ level of probability.

در آبیاری تناوبی نیز بالاترین نیتروژن جذب شده در دانه (۱۱۰/۷۳ کیلوگرم در هکتار) در تیمار ۲۰ تن بایوچار و ۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه شده و بدون مصرف باکتری حاصل شد و پایین‌ترین (۸/۳۷ کیلوگرم در هکتار) مقدار صفت مذکور در این شیوه آبیاری مربوط به شاهد ۵۰ درصد نیتروژن توصیه شده بود. بیشترین جذب نیتروژن کاه در هر دو شیوه آبیاری غرقاب (۴۳/۲۲ کیلوگرم در هکتار) و تناوبی (۴۰/۴۱ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و به همراه مصرف باکتری بود. و کمترین جذب نیتروژن کاه در هر دو شیوه آبیاری غرقاب (۴/۵۱ کیلوگرم در هکتار) و تناوبی (۲/۹۷ کیلوگرم در هکتار) در تیمار ۷۵ درصد نیتروژن و بدون مصرف بایوچار و باکتری حاصل شد (جدول ۴ و ۵).

بالاترین جذب نیتروژن کل گیاه نیز در هر دو شیوه آبیاری مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و به‌همراه مصرف باکتری در غرقاب (۱۳۷/۵۴ کیلوگرم در هکتار) و بدون مصرف باکتری در تناوبی (۱۳۸/۰۹ کیلوگرم در هکتار) بود، و پایین‌ترین جذب نیتروژن کل گیاه در هر دو شیوه آبیاری غرقاب (۲۰/۹ کیلوگرم در هکتار) و تناوبی (۱۱/۶۵ کیلوگرم در هکتار) در تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + بدون مصرف بایوچار، بدون باکتری بود (جدول ۴ و ۵). همان‌طور که مشاهده شد بیشترین میزان نیتروژن دانه، کاه و کل گیاه در سطح ۲۰ تن بایوچار در هکتار به‌همراه ۷۵ تا ۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه شده و کمترین میزان نیتروژن دانه، کاه و کل گیاه در عدم حضور بایوچار به‌دست آمد، در واقع بایوچار با سطح ویژه بالا، بار سطحی منفی، چگالی بالا و ساختار متخلخل موجب بهبود خواص شیمیایی خاک مثل pH، ظرفیت تبادل کاتیونی و عناصر غذایی قابل دسترس می‌شود (Gaskin et al., 2010). هم‌چنین با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک منجربه جذب عناصر غذایی روی سطوح خاک و افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاه و کاهش آب‌شویی عناصر غذایی می‌شود (Lehmann et al., 2003). در همین راستا، در آزمایشی روی گیاه ذرت مشاهده شده که مقدار ماده خشک ذرت در زمان کاربرد بایوچار و در غیاب کود نیتروژن در تمام تیمارها افزایش چشم‌گیری نداشت. ولی، افزایش میزان بایوچار (۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار) به‌همراه ۱۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار منجر به افزایش عملکرد قابل توجهی در گیاه شد. بنابراین، مشاهده شد که بایوچار به‌همراه کود نیتروژنه تأثیر بیشتری در افزایش میزان نیتروژن گیاه دارد (Gaskin et al., 2010; Cheng et al., 2008).

در شرایط آبیاری غرقابی باکتری *آزوسپریلیوم* با تثبیت نیتروژن برای گیاه موجب افزایش جذب و در پی آن میزان نیتروژن موجود در دانه و اندام‌های هوایی برنج شد، در همین راستا عموآقایی و همکاران (Amou-Aghai et al., 2003) اظهار داشتند که کاربرد سویه‌های باکتری *آزوسپیریلوم*، محتوای نیتروژن دانه و اندام‌های هوایی را نسبت به شاهد افزایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فعالیت باکتری در آبیاری تناوبی به‌دلیل کاهش رطوبت خاک و تر و خشک کردن متوالی زمین کاهش یافته و لذا، باکتری نتوانسته تأثیر معنی‌داری بر میزان جذب نیتروژن و کاه برنج داشته باشد. محققان با بررسی میزان تحمل خشکی، تعدادی از سویه-هایی باکتری‌های محرک رشد (PGPR) اذعان داشتند که تنش خشکی موجب تأثیر معنی‌دار کاهش رشد و فعالیت جدایه‌های انتخابی باکتری‌های محرک رشد شد (Sarcheshmehpour et al., 2009). درنهایت، می‌توان گفت میزان جمعیت باکتری‌های محرک رشد با افزایش میزان خشکی کاهش می‌یابد، ولی با بهبود رطوبت خاک مجدداً افزایش می‌یابد (Worrall & Roughly, 1976).

شاخص برداشت نیتروژن (HI_N)

تفاوت سطوح کودی مورد بررسی در سطح احتمال یک درصد و شیوه آبیاری در سطح پنج درصد آماری از لحاظ میزان شاخص برداشت نیتروژن معنی‌دار و تیمار باکتری بی‌معنی بود. تمامی اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه نیز در این شاخص اثر معنی‌داری نشان داد (جدول ۳).

هم‌چنین نتایج گویای این مطلب بود که در اثرات متقابل کود، باکتری و شیوه آبیاری که بیشترین (۸۹/۶۱ درصد) میزان شاخص برداشت نیتروژن در شیوه آبیاری غرقاب در تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + ۱۰ تن بایوچار و بدون مصرف باکتری و کمترین (۶۱/۸۷ درصد) میزان شاخص برداشت نیتروژن در تیمار ۱۰۰ درصد نیتروژن + بدون مصرف بایوچار و باکتری اتفاق افتاد، که نشان‌دهنده کاهش ۲۷/۸ درصدی شاخص برداشت نیتروژن نسبت به تیمار حداکثری (تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + ۱۰ تن بایوچار و بدون مصرف باکتری) می‌باشد (جدول ۴). در آبیاری تناوبی بالاترین (۹۱/۱۴ درصد) درصد شاخص برداشت نیتروژن در تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + بدون مصرف بایوچار و

با مصرف باکتری و پایین‌ترین (۶۸/۱۹ درصد) میزان شاخص برداشت نیتروژن در تیمار۱۰۰ درصد نیتروژن + بدون مصرف بایوچار و باکتری اتفاق افتاد (جدول ۵). در واقع، می‌توان گفت تیمارهای مذکور تأثیر یکسانی بر میزان نیتروژن دانه و کاه داشته است و هر دو را به یک نسبت افزایش داده و یا تأثیر بیشتری بر میزان نیتروژن کاه گذاشته است. در گزارشی نشان داده شد که شاخص برداشت نیتروژن ژنوتیپ‌های برنج با افزایش مصرف نیتروژن به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش حاضر با نتایج آزمایش طایفه و همکاران (Tayefe et al., 2014) مطابقت دارد. شاخص برداشت نیتروژن یک شاخص مهم در تقسیم و توزیع نیتروژن بین اندام‌های مختلف در گیاهان زراعی است و نشان می‌دهد گیاه تا چه اندازه از نیتروژن جذب شده برای تولید دانه استفاده کرده است (Fageria et al., 2008).

با توجه به نتایج این آزمایش، به‌نظر می‌رسد که سطوح بالای کاربرد کود نیتروژن نسبت به سطوح پایین‌تر منجر به کاهش معنی‌داری در این شاخص شده است. علت این روند را می‌توان چنین بیان داشت که با افزایش کاربرد نیتروژن، در یک محدوده خاص انتقال نیتروژن به دانه‌ها مشابه با جذب بیشتر نیتروژن از خاک، متوقف خواهد شد. در آزمایشی در رابطه با ارقام گندم و جو به‌طور مشابه مشخص شد که افزایش مصرف نیتروژن منجر به کاهش معنی‌دار در شاخص برداشت نیتروژن شد. همچنین در همان آزمایش بین تمام سطوح کودی، تفاوت معنی‌داری برای این شاخص مشاهده شد (Bouman.2005,).

کارایی بازیافت کود نیتروژن (RE_N)

نتایج تجزیه واریانس مبین این مطلب بود که پیامدهای ساده شیوه آبیاری، کود و باکتری و برهم‌کنش دوگانه شیوه آبیاری × کود و کود × باکتری و برهم‌کنش سه‌گانه شیوه آبیاری × کود × باکتری در سطح احتمال یک درصد بر کارایی بازیافت کود نیتروژن معنی‌دار شد، و تنها برهم‌کنش دوگانه شیوه آبیاری × باکتری اثر معنی‌داری نشان نداد (جدول ۳).

در کارایی بازیافت کود نیتروژن تیمار ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و به‌همراه مصرف باکتری در آبیاری غرقاب حداکثر کارایی بازیافت کود نیتروژن (۱/۶) را نشان داد؛ و حداقل کارایی بازیافت کود نیتروژن در آبیاری غرقاب (۰/۰۶) مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد نیتروژن و بدون مصرف بایوچار و باکتری بود. درحالی‌که بیشینه این شاخص در آبیاری تناوبی (۱/۳) مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و بدون مصرف باکتری به‌دست آمد؛ که البته تفاوت معنی‌داری با تیمارهای ۱۰۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و به‌همراه مصرف باکتری و ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و با مصرف باکتری نشان نداد؛ و کمینه آن در آبیاری تناوبی (۰/۰۶) مربوط به تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + بدون بایوچار و بدون مصرف باکتری بود (جدول ۴ و ۵). کارایی بازیافت کود نیتروژن در واقع نشان‌دهنده کیلوگرم افزایش جذب نیتروژن به‌ازای کیلوگرم نیتروژن مصرفی است، این شاخص بستگی به تطابق نیاز گیاه و رهاسازی نیتروژن از کود و خاک دارد، تحت تأثیر مدیریت مصرف (مقدار، زمان، جای‌گذاری، شکل نیتروژن) و عواملی است که مقدار مصرف نیتروژن را تعیین می‌کند (ژنوتیپ گیاه، آب و هوا، تراکم گیاه، تنش‌های زنده و غیر زنده) قرار می‌گیرد. به‌طور کلی، با افزایش مصرف کود از میزان کارایی جذب نیتروژن کاسته می‌شود که به‌نظر می‌رسد، علت آن افزایش تلفات نیتروژن و به‌تبع آن کاهش فراهمی و از دسترس خارج شدن این عنصر تحت تأثیر دلایل مختلف ازجمله آب‌شویی مربوط باشد. در گزارشی، علت کاهش کارایی جذب نیتروژن در گندم آزاد شدن سریع نیتروژن در کود اوره ذکر گردید (Yang et al., 2011) در مطالعه‌ای دیگر گزارش شد که کارایی جذب نیتروژن با افزایش سطوح کودی کاهش پیدا کرد و این کاهش در شرایط بدون مالچ در مقایسه با کاربرد مالچ شدیدتر بود. دلیل این موضوع آب‌شویی بیشتر کود در شرایط عدم استفاده از مالچ ذکر گردید (Singh, 2012). نتایج آزمایشی نشان داد که کارایی جذب نیتروژن با مقدار مصرف کود نیتروژن رابطه عکس داشت، به‌طوری‌که با افزایش مصرف کود بر اساس قانون بازده نزولی کارایی جذب نیتروژن کاهش یافت. در آزمایش حاضر بهترین کارایی بازیافت کود در هر دو شیوه آبیاری با مصرف ۲۰ تن بایوچار به‌همراه ۷۵ تا ۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه‌شده حاصل شد، و اگر بایوچار استفاده نشود در آبیاری غرقاب کمترین کارایی بازیافت، در ۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه شده به‌دست آمد که این امر نشان می‌دهد در صورت عدم مصرف بایوچار (به‌دلیل آب‌شویی زیاد در این شیوه آبیاری) نباید مقدار کود نیتروژن مصرفی افزایش پیدا کند، ولی در آبیاری تناوبی کمترین کارایی بازیافت در نیتروژن ۵۰ درصد توصیه‌شده حاصل شد که نشان می‌دهد در آبیاری تناوبی در صورت عدم استفاده از بایوچار بهتر است مصرف کود نیتروژن افزایش پیدا کند. بایوچار به خاطر سطح ویژه زیاد و تراکم بار سطحی بالا توانایی خاک

برای نگه‌داری عناصر غـذایی و آب قابـل‌اسـتفاده گیـاه را افـزایش و شستشوی عناصر غذایی و کودها را کاهش مـی‌دهـد (Laird et al., 2010). در آبیاری غرقاب اختلاف بین کم‌ترین (۱۰۰ درصد نیتـروژن + بدون بایوچار و بدون باکتری) و بیشترین (۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و با باکتری) کارایی بازیافت کود نیتروژن ۱/۵۴ کیلوگرم بر کیلوگرم می‌باشد. از طرفی، در آبیاری تناوبی تفاوت بین کمتـرین (۵۰ درصد نیتروژن + بـدون بایوچـار و بـدون بـاکتری) و بیشـترین (۱۰۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و بدون مصرف باکتری) این شاخص ۱/۲۴ کیلوگرم بر کیلوگرم بود.

کارایی بازیافت کود نیتروژن در واقع نشان‌دهنده کیلوگرم افزایش جذب نیتروژن به‌ازای کیلوگرم نیتـروژن مصـرفی اسـت. در واقـع بـا اعمال تیمار کودی ۲۰ تن بایوچار به‌ازای هر یـک کیلـوگرم افـزایش کود نیتروژن در حضور بایوچـار بـه‌میـزان ۱/۵۴ کیلـوگرم در آبیـاری غرقاب و ۱/۲۴ کیلوگرم در آبیـاری تنـاوبی جـذب نیتـروژن از خـاک افزایش یافت. همان‌گونه که نشان داده شد، در هـر دو شـیوه آبیـاری تیمار کودی توانست موجب افزایش کارایی بازیافت کود نیتروژن شود، ولی میزان تأثیر تیمار کودی مذکور در افزایش کـارایی بازیافـت کـود نیتروژن در شرایط آبیاری غرقاب بیشتر از تناوبی بوده اسـت؛ و مـی‌توان دلیل آن را به جذب و نگه‌داری بیشتر نیتروژن توسط بایوچـار در آبیاری غرقاب و جلوگیری از آب‌شویی کمتـر نیتـروژن در ایـن شـیوه آبیاری نسبت داد (جدول ۵). بایوچار می‌تواند ظرفیت تبـادل کـاتیونی خاک را تا ۵۰ درصد افزایش دهد و با افزایش ظرفیت تبادل کـاتیونی خاک از شستشوی عناصر غذایی جلوگیری کـرده و فراهمـی آن‌هـا را برای گیاه افزایش دهد (Lehmann et al., 2003). در همـین راسـتا، محققان تأثیر بایوچار بر خصوصیات خاک و جذب عناصرغذایی توسط کاهو را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیـق نشـان داد، بایوچـار موجب افزایش قابلیت هدایت الکتریکی، کـربن آلـی، نیتـروژن کـل، فسفر قابل دسترس، ظرفیت تبادل کاتیونی مـی‌گـردد (Nigussie, 2012).

کارایی فیزیولوژیک کود نیتروژن (PE_N)

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) بیانگر این مطلب بـود کـه تمـام اثرات ساده و برهم‌کنش دوگانـه آبیـاری × کـود و کـود × بـاکتری و برهم‌کنش سه‌گانه آبیاری × کـود × بـاکتری در سـطح احتمـال یـک درصد بر کارایی فیزیولوژیک کود نیتروژن معنی‌دار گردید.

اثر متقابل سه‌گانه آبیاری × کود × باکتری (جدول ۴ و ۵) حـاکی از آن است که در شیوه آبیاری غرقـاب بیشـترین (۱۴۶/۲۵ کیلـوگرم دانه به‌ازای کیلوگرم نیتروژن جذب شـده) کـارایی فیزیولوژیـک کـود نیتروژن مربوط به تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و بـدون مصرف باکتری بود و کمترین میزان ایـن شـاخص (۱۷/۹۱ کیلـوگرم دانه به‌ازای کیلوگرم نیتروژن جذب شده) در همـین شـیوه آبیـاری در تیمار ۱۰۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و به‌همراه مصرف باکتری مشاهده شد در آبیاری تناوبی بیشترین (۱۸۳/۵۲ کیلوگرم دانه بـه‌ازای کیلوگرم نیتروژن جذب شده) مقدار این شـاخص در تیمـار ۷۵ درصـد نیتروژن + بدون مصرف بایوچار و بـاکتری بـه‌دسـت آمـد و کمتـرین میزان کارایی فیزیولوژیک کـود نیتـروژن در آبیـاری تنـاوبی (۲۷/۲۵ کیلوگرم دانه به‌ازای کیلوگرم نیتروژن جذب شـده) مربـوط بـه تیمـار ۱۰۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و با مصرف باکتری بود. کارایی فیزیولوژیک کـود نیتـروژن در واقـع نشـان‌دهنـده کیلـوگرم افـزایش عملکرد به‌ازای کیلوگرم افزایش جذب نیتروژن از کود را نشـان مـی‌دهد. کارایی فیزیولوژیک کود نیتروژن یا توانـایی گیـاه بـرای تبـدیل نیتروژن جذب شده از کـود بـه عملکـرد اقتصـادی (دانـه) بیشـتر بـه ژنوتیپ گیاه، و کمتر به مدیریت و محیط بستگی دارد، به‌همین دلیـل مشاهده می‌شود، در هر دو شیوه آبیاری کمترین مقدار این شاخص بـا مصرف ۲۰ تن بایوچار و ۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه‌شده حاصل شـد. در واقع می‌توان اظهار داشت که بایوچار موجب افـزایش جـذب کـود نیتروژن توسط گیاه شده، ولی گیاه به همان نسبت نتوانسته نیتـروژن جذب شده را تبـدیل بـه عملکـرد اقتصـادی کنـد. در همـین راسـتا، محققان گزارش کردند که کارایی فیزیولوژیـک نیتـروژن بـا افـزایش مقدار نیتروژن از ۵۰ به ۱۵۰ کیلوگرم نیتـروژن در هکتـار بـه صـورت خطی کاهش یافت (Ameri et al., 2007). در تحقیقی، چنین عنوان شد که کارایی فیزیولوژیک نیتروژن با افزایش مصرف نیتروژن کاهش می‌یابد. آنان نتیجه گرفتند که مصرف زیـاد کـود نیتـروژن از طریـق تحریک افزایش جذب نیترات و اشباع فرآیندهای متابولیسم نیتـروژن باعث کاهش نسبت کربن بـه نیتـروژن و در نتیجـه، کـاهش کـارایی فیزیولوژیک نیتروژن می‌شود (Jiang & Hull, 1988).

کارایی داخلی کود نیتروژن (IE_N)

با توجه به نتایج (جدول ۳) به‌دست آمده مشخص شد کـه میـزان کارایی داخلی کود نیتروژن تحت تأثیر اثر ساده کود، بـاکتری و همـه

برهم‌کنش‌های دوگانه و سه‌گانه عوامل فوق در سطح احتمال یک درصد و شیوه آبیاری در سطح احتمال پنج درصد قرار گرفت و تأثیر معنی‌داری را از خود نشان داد.

در بررسی اثر متقابل بین تیمارهای آزمایش مشخص شد (جدول ۴ و ۵) که بیشترین کارایی داخلی کود نیتروژن در شیوه آبیاری غرقاب (۱۴۴/۵۸) مربوط به تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و بدون مصرف باکتری و تناوب (۱۶۸/۷۲) در تیمار ۷۵ درصد نیتروژن + بدون مصرف بایوچار و باکتری است. کمترین کارایی داخلی کود نیتروژن در هر دو شیوه آبیاری غرقاب (۳۱/۸) و تناوبی (۳۵/۱۹) در تیمار ۱۰۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و با مصرف باکتری به‌دست آمد. کارایی داخلی کود نیتروژن در واقع نشان‌دهنده کیلوگرم عملکرد به‌ازای کیلوگرم نیتروژن جذب شده است. و در واقع، توانایی گیاه برای تبدیل نیتروژن جذب شده از تمام منابع (خاک و کود) به عملکرد اقتصادی (دانه) می‌باشد. کارایی داخلی نیتروژن تا حد زیادی به ژنوتیپ، شاخص برداشت، محیط، تأثیر متقابل با سایر عناصر غذایی و عوامل دیگری که گل‌دهی و پرشدن دانه را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بستگی دارد (Dobermann & Fairhurst, 2000).

با توجه به نتایج حاصله، مشاهده می‌شود که کارآیی داخلی نیتروژن روندی مشابه با شاخص کارآیی فیزیولوژیک نیتروژن دارد. با این تفاوت که در کارایی داخلی منبع نیتروژن هم خاک و هم کود محسوب می‌شود، امّا در کارایی فیزیولوژیک تنها نیتروژن کود مدنظر است، در نتیجه در این شاخص نیز در هر دو شیوه آبیاری کمترین مقدار با مصرف ۲۰ تن بایوچار و ۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه مشاهده شد، در واقع، می‌توان اظهار داشت که بایوچار موجب افزایش جذب نیتروژن کود و خاک توسط گیاه شده، ولی گیاه به همان نسبت نتوانسته نیتروژن جذب‌شده را تبدیل به عملکرد اقتصادی کند. در حقیقت در سطوح بالای کاربرد نیتروژن، نیتروژن تجمع‌یافته در اندام-ها هم راستا با مصرف آن نیست. در مقابل وجود برخی خصوصیات زراعی و ژنتیکی بین ارقام مورد مطالعه می‌تواند تفاوت موجود در کارآیی داخلی نیتروژن را بین آن‌ها توجیه کند. کارایی داخلی نیتروژن با افزایش مقدار مصرف نیتروژن به‌طور نمایی کاهش یافته و ۲۴/۸ درصد از تغییر در کارایی داخلی نیتروژن را می‌توان با مقدار مصرف نیتروژن تفسیر کرد (Sheng-guo et al., 2015).

کارایی زراعی کود نیتروژن (AE_N)

با استناد به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) مشخص شد که تمام اثرات ساده و برهم‌کنش دوگانه آبیاری × کود و کود × باکتری و برهم‌کنش سه‌گانه آبیاری × کود × باکتری در سطح احتمال یک درصد بر کارایی زراعی کود نیتروژن معنی‌دار گردید؛ و تنها برهم‌کنش دوگانه شیوه آبیاری × باکتری اثر معنی‌داری نشان نداد.

با مقایسه میانگین‌ها (جدول۴ و ۵) در هر دو شیوه آبیاری غرقاب (۶۷/۰۶ کیلوگرم دانه به کیلوگرم کود نیتروژن مصرف شده) و تناوبی (۶۶/۶۶ کیلوگرم دانه به کیلوگرم کود نیتروژن مصرف شده) معلوم شد که بیشترین کارایی زراعی کود نیتروژن مربوط به تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و به‌همراه مصرف باکتری بود کمترین میزان کارایی زراعی کود نیتروژن در هر دو روش آبیاری غرقاب (۴/۲۳ کیلوگرم دانه به کیلوگرم کود نیتروژن مصرف شده) و تناوبی (۱۰/۶۴ کیلوگرم دانه به کیلوگرم کود نیتروژن مصرف شده) مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد نیتروژن + بدون بایوچار و بدون مصرف باکتری بود. جدول ۴ حاکی از آن است که در آبیاری غرقاب اختلاف بین کمترین (۱۰۰ درصد نیتروژن + بدون بایوچار و بدون باکتری) و بیشترین (۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و با باکتری) عملکرد کاه ۶۲/۸۳ کیلوگرم دانه به کیلوگرم کود نیتروژن مصرف شده می‌باشد. از طرفی، در آبیاری تناوبی تفاوت بین حداقل (۱۰۰ درصد نیتروژن + بدون بایوچار و بدون باکتری) و حداکثر (۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و با باکتری) این شاخص ۵۶/۰۲ کیلوگرم دانه به کیلوگرم کود نیتروژن مصرف شده بود (جدول ۳). همان‌گونه که نشان داده شد، در هر دو شیوه آبیاری، تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و با مصرف باکتری توانسته موجب افزایش کارایی زراعی کود نیتروژن شود، ولی میزان این تأثیر در شرایط آبیاری تناوبی بیشتر از غرقاب بوده است. در واقع، در هر دو شیوه آبیاری بیشترین میزان کارایی زراعی نیتروژن در پایین‌ترین میزان کود نیتروژن و بالاترین میزان بایوچار به‌دست آمد و کمترین میزان کارایی زراعی در بالاترین مقدار کود نیتروژن و عدم مصرف بایوچار به‌دست آمد، کارایی زراعی کود نیتروژن در واقع نشان‌دهنده کیلوگرم افزایش عملکرد به‌ازای کیلوگرم نیتروژن مصرف شده است، این شاخص حاصل بازیافت عنصر از کود آلی و معدنی و کارایی که با آن گیاه از هر واحد اضافی عنصر استفاده می‌کند، بستگی دارد. با توجه به قانون بازده نزولی در مورد مصرف عناصر غذایی مبنی بر اینکه واحدهای اولیه کود مصرفی تأثیر

بیشتری بر عملکرد دارند، هرقدر مصرف نیتروژن افزایش یابد، کارایی استفاده از آن کاهش می‌یابد (Liang et al., 2006) در گزارش محققان دیگری نیز به کاهش کارایی زراعی نیتروژن در اثر افزایش مصرف نیتروژن اشاره شده است (Aref et al., 2012; Malviya et al., 2012).

محققان گزارش کردند که با افزایش مقدار نیتروژن، کارایی زراعی نیتروژن در گل همیشه بهار کاهش یافته و از ۱۴ گرم گل خشک بر گرم نیتروژن در سطح ۵۰ به ۶ گرم گل خشک در گرم نیتروژن در سطح ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، کاهش یافت (Ameri et al., 2007). نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش مقدار مصرف کود نیتروژن، کارایی زراعی کاهش یافت. این موضوع نشان می‌دهد که قابلیت افزایش عملکرد در هر کیلوگرم نیتروژن با افزایش مصرف کود نیتروژن به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد (Tayefe et al., 2011). در یک آزمایش که بیشتر از ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن در زراعت برنج مصرف شد، کارایی زراعی مصرف نیتروژن کمتر از ۱۰ کیلوگرم بر کیلوگرم بود. کارایی زراعی مصرف نیتروژن منفی زمانی مشاهده شد که عملکرد دانه با مصرف کود نیتروژن کاهش یافت (Peng et al., 2011).

بهره‌وری نسبی نیتروژن (PEP_N)

نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۳) گویای این مطلب بود که تفاوت معنی‌دار بین شیوه‌های آبیاری، مصرف باکتری و سطوح مختلف کودی در سطح یک درصد از نظر کارآیی بهره‌وری نیتروژن وجود دارد، همچنین کلیه اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه به‌غیر از اثر متقابل شیوه آبیاری با مصرف باکتری بر این صفت تفاوت معنی‌دار نشان داد.

در اثر متقابل سه‌گانه شیوه آبیاری × کود × باکتری بیشترین کارایی بهره‌وری نیتروژن در هر دو شیوه آبیاری غرقاب (۱۱۰/۴۸ کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن) و تناوبی (۹۱/۶۲ کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن) مربوط به تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و به‌همراه مصرف باکتری بود. همچنین کمترین مقدار این شاخص در هر دو شیوه آبیاری غرقاب (۲۵/۹۴ کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن) و تناوبی (۲۳/۱۲ کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن) در تیمار ۱۰۰ درصد نیتروژن به‌دست آمد (جدول ۴ و ۵). بهره‌وری نسبی نیتروژن در واقع نشان‌دهنده کیلوگرم عملکرد برداشت شده به‌ازای کیلوگرم نیتروژن مصرف شده است، این شاخص مهم‌ترین شاخص برای کشاورزان می‌باشد، تلفیقی ازکارایی نیتروژن مصرفی و بومی خاک است، عرضه زیاد نیتروژن بومی خاک و کارایی زراعی بالا اهمیت یکسانی در آن دارد. با بررسی جداول ۴ و ۵ تجزیه واریانس می‌توان اظهار داشت که کاربرد ۲۰ تن بایوچار به‌همراه ۵۰ درصد نیتروژن و با مصرف باکتری توانست موجب افزایش معنی‌دار بهره‌وری نسبی نیتروژن (۸۴/۵۴ کیلوگرم در آبیاری غرقاب و ۶۸/۵ کیلوگرم در آبیاری تناوبی دانه بیشتری در ازای مصرف نیتروژن کمتری) نسبت به شاهد ۱۰۰ درصد نیتروژن شود. در واقع با مصرف ۵۰ درصد نیتروژن توصیه شده همراه با ۲۰ تن بایوچار به‌میزان دانه بیشتری در برابر مصرف ۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه شده و بدون مصرف بایوچار دست پیدا کردیم.

با توجه به نتایج حاصله، به نظر می‌رسد که مشابه با دو شاخص کارآیی مصرف نیتروژن و کارآیی جذب نیتروژن، شاخص کارآیی بهره‌وری نیتروژن نیز مستقیماً تابعی از عملکرد دانه برنج می‌باشد. در این آزمایش، با افزایش مصرف کود نیتروژن مقدار این شاخص کاهش یافت که این کاهش را می‌توان به‌دلیل وجود رابطه‌ی غیرخطی بین افزایش مصرف نیتروژن و بهبود عملکرد دانه مرتبط دانست. لازم به ذکر است که شاخص کارآیی مصرف نیتروژن حاصل‌ضرب شاخص‌های کارآیی بهره‌وری نیتروژن و کارآیی جذب نیتروژن می‌باشد. این اجزا حالت موازنه با یکدیگر را دارند. لذا، افزایش دریکی از این اجزاء با کاهش در جزء دیگر همراه خواهد شد (Fallah Talae Kalaei et al., 2014). در بسیاری از مطالعات گزارش شده است که کارآیی بهره‌وری نیتروژن با افزایش در مقدار نیتروژن مصرفی علی‌رغم افزایش در، عملکرد دانه، کاهش یافت (Bouman et al., 2005; Egamberdiyeva et al., 2004)، به دلایل ذکر شده، با افزایش مصرف کود کاهش بهره‌وری نیتروژن امری اجتناب‌ناپذیر است، ولی با توجه جداول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود با افزایش سطوح کود نیتروژن همراه با افزایش مصرف بایوچار بهره‌وری نیتروژن با شیب کم‌تری کاهش پیدا می‌کند و این امر نشان‌دهنده تأثیر بایوچار بر افزایش بهره‌وری کود نیتروژن می‌باشد. علاوه‌براین، بایوچار از لحاظ اقتصادی قابل توصیه می‌باشد، زیرا مصرف کودهای معدنی تجاری را کاهش می‌دهد (Steiner et al., 2006). تحقیقات نشان داده است که بایوچار موجب تغییرات پویایی نیتروژن در خاک می‌شود (Lehmann, 2007). محققان گزارش کردند که هوازدگی

بایوچار در خاک منجر به تثبیت نیتروژن می‌شود. همچنین، بسته به نوع مواد اولیه بایوچار و مدت زمان تماس آن با خاک، در سطوح بالای کاربرد بایوچار بین ۱۰ تا ۲۰ درصد وزنی آب‌شویی آمونیوم کاهش می‌یابد (Singh, 2012). علاوه‌براین محققان مشاهده کردند، در سطوح بالای مصرف بایوچار جذب نیتروژن افزایش یافت. از آنجا که نیتروژن جذب شده توسط گیاهان به‌شکل نیترات می‌باشد، بنابراین جذب آن به‌همراه کاتیون‌های اساسی به‌منظور حفظ تعادل الکتریکی ضروری می‌باشد. نیتروژن به فرم‌های نیترات و آمونیوم به‌میزان کمی در بایوچار یافت می‌شود. بنابراین، در دسترس بودن و سرعت معدنی شدن نیتروژن آلی موجود در بایوچار به‌کار رفته در خاک، نشان‌دهنده توانایی بایوچار در آزادسازی تدریجی نیتروژن موجود در کود می‌باشد (Chan et al., 2008).

نتیجه‌گیری

بر اساس یافته‌ها، مصرف ۲۰ تن بایوچار به همراه ۷۵ تا ۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه شده همراه با مصرف باکتری در شیوه آبیاری غرقاب و بدون مصرف باکتری در آبیاری تناوبی بیشترین تأثیر را بر میزان جذب و غلظت نیتروژن و پروتئین دانه برنج داشته است و متقابلاً کمترین میزان صفات مذکور در عدم مصرف بایوچار و باکتری و ۵۰ درصد نیتروژن توصیه شده به‌دست آمد. بالاترین میزان شاخص‌های کارایی نیتروژن با مصرف ۲۰ تن بایوچار به همراه ۵۰ تا ۷۵ درصد نیتروژن توصیه‌شده، همراه با مصرف باکتری در شیوه آبیاری غرقاب و بدون مصرف باکتری در آبیاری تناوبی حاصل شده است و کمترین اندازه شاخص‌های کارایی نیتروژن با استفاده از ۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه‌شده و عدم مصرف بایوچار و باکتری به‌دست آمد. در نهایت می‌توان این‌طور اذعان داشت که مصرف هم‌زمان کود آلی و زیستی همراه با کود نیتروژن، قابلیت دسترسی و جذب نیتروژن را در مراحل مختلف رشد گیاه افزایش داده و در پی آن سبب بهبود شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن می‌شود، امّا در این رابطه دو نکته حائز اهمیت است: ۱- هرچند بایوچار با حفظ و نگه‌داری نیتروژن در خاک توانست جذب نیتروژن توسط گیاه و در پی آن، افزایش غلظت نیتروژن در دانه و اندام‌های گیاه برنج را افزایش دهد، امّا این میزان تأثیرگذاری بایوچار بر جذب نیتروژن با اندازه مصرف کود با یک نرخ افزایش نمی‌یابد. به عبارتی دیگر، در شرایط کاربرد مقدار زیاد کود نیتروژن یا وجود نیتروژن بالا در خاک، بایوچار تا حد زیادی موجب بیشتر و بهتر در دسترس قرار گرفتن کود نیتروژن برای گیاه می‌شود، ولی شیب افزایش میزان این تأثیرگذاری با بالا رفتن مصرف کود نیتروژن کاهش پیدا می‌کند. ۲- به‌کارگیری باکتری در شرایط غرقاب توانست موجب افزایش جذب و بهره‌وری نیتروژن توسط گیاه برنج شود، امّا در شرایط آبیاری تناوبی، به‌دلیل تر و خشک کردن متوالی زمین زراعی و در نتیجه، مهیا نبودن شرایط محیطی و رطوبت خاک برای فعالیت و رشد باکتری جذب و بهبود شاخص‌های کارایی نیتروژن برنج توسط باکتری *آزوسپریلیوم* به‌طور معنی‌داری بهبود نیافت.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و همچنین از تمام افرادی که ما را در انجام این طرح پژوهشی یاری نمودند، تشکر و قدردانی به‌عمل آورند.

Refrences

Agrawal, S., and Rathore, P., 2014. Nanotechnology pros and cons to agriculture: A review. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 3: 43-55. DOI: 10.13140/2.1.3352.1283

Ameri, A., Nassiri Mahallati, M., and Rezvani, P., 2007. Effects of different nitrogen levels and plant density on flower, essential oils and extract production and nitrogen use efficiency of Marigold (*Calendula officinalis* L.). Iranian Journal of Field Crops Research 5 (2): 15-325. DOI: 10.22067/GSC.V5I2.1153 (In Persian with English Summary)

Amou-Aghai, R., Mostajeran, A., and Emtiyazi, G., 2003. The effect of *Azospirillum* on some growth and yield indices three wheat cultivars. Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources 127-138: (2)7. (In Persian with English Summary) https://doi.org/ 10.13140/2.1.3352.1283

Aref, M., Ali, A., Umair, M., Munsif, F., Ali, K., Inamullah, M.S., and Ayub, G., 2012. Effect of biochar FYM and mineral nitrogen alone and in combination on yield and yield components of maize. Sarhad Journal of Agriculture 28(2): 191-195.

Bashan, Y., and Holguin, G., 1997. *Azospirillum*–plant relationships: Environmental and physiological advances (1990–

1996). Canadian Journal of Microbiology 43(2): 103-121. DOI: 10.1139/m97-015

Basso, B., and Ritchie, J.T., 2005. Impact of compost, manure and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize-alfaalfa rotation in Michigan Agriculture Ecosystem and Enviroment 108: 329-341. DOI: 10.1016/j.agee.2005.01.011

Board, N., 2004.The complete technology book on bio-fertilizer and organic farming National Institute of Industrial Research (NIIR). pp: 620.

Bouman, B.A.M., Peng, S., Castaneda, A.R., and Visperas, R.M., 2005. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems. Agricultural Water Management 74: 87–105. DOI: 10.1016/j.agwat.2004.11.007

Busscher, W.J., Novak, J.M., Caesar-TonThat, T., and Sojka, R.E., 2007. Amendments to increase aggregation in United States southeastern coastal plain soils. Soil Science 172: 651–658. DOI: 10.1097/ss.0b013e3180601266

Cao, X., and Harris, W., 2010. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. Bioresource Technology 101: 5222-5228. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.02.052

Chan, K.Y., and Xu, Z.H., 2009. Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement. In: J. Lehmann, and S. Joseph (Eds.), Biochar for Environmental Management: Science and Technology (5 Ed., pp. 67-84). Earthscan.

Chan, K., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., and Joseph, S., 2008. Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment. Soil Research 45: 629-634. DOI: 10.1071/SR07109

Cheng, C.H., Lehmann, J., and Engelhard, M.H., 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. Journal of Geochimica ET Cosmochimica Acta 72: 1598-1610. DOI: 10.1016/j.gca.2008.01.010

Ding, Y., Liu, Y.X., Wu, W.X., Shi, D.Z., Yang, M., and Zhong, Z.K., 2010. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns. Water, Air, and Soil Pollution 213: 47-55. DOI: 10.1007/s11270-010-0366-4

Dobermann, A., and Fairhurst, T., 2000. Rice nutrient disorders and nutrient management. IRRI, Philippines, PPI, USA and PPIC, Canada, pp. 31-40.

Eastman, C.M., 2011. Soil Physical Characteristics of an Aeric Ochraqualf amended with Biochar. M.Sc. Thesis Ohio State University. Available online at: https://etd.ohiolink.edu/ap:10:0::NO:10:P10_ETD_SUBID:75152. Accessed 23 January 2014.

Egamberdiyeva, D., Juraeva, D., Poberejskaya, S., Myachina, O., Teryuhova, P Seydalieva, L., and Aliev, A., 2004. Improvement of wheat and cotton growth and nutrient uptake by phosphate solubilizing bacteria. Proceedings of the 26th Southern Conservation Tillage Conference for Sustainable Agriculture. Raleigh, North Carolina, 8 June, p. 58-66

Eidizadeh, M.K., Damghani, A.M., Sabahi, H., and Sufizadeh, S., 2010. Effects of biological fertilizer application in combination with chemical fertilizer on the growth of maize (*Zea mays* L.) in Shushtar. Journal of Agroecology 2(12): 292-301. (In Persian with English Summary). DOI: 10.22067/JAG.V2I2.7636

Emami, A., 1996. Plant Analytical MethodsSoil and Water Research Institute, Technical Bullten, No. 982. pp. 128. (In Persian)

Fageria, N.K., and Santos, A.B., 2018. Comparative efficiency of nitrogen sources for lowland rice production. Commun. Soil Science and Plant Analysis 49(5): 515-525. DOI: 10.1080/00103624.2018.1424892

Fageria, N.K. and Santos, A.B., 2008. Yield physiology of dry Bean. Journal of Plant Nutrition 31: 983-1004. DOI: 10.1080/01904160802096815

Fallah Talae-Kalaei, S., Bahmanyar, M.A., Sadeghzadeh, F., and Emadi, S.M., 2014. The impact of biochar application and urban waste compost on the status of soil sood nutrition under rice cultivation, 4th International Conference on Environmental Challenges and Tree Chronology, Sari, Caspian Ecosystems Research Institute, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. (In Persian)

Fields, S., 2004. Global nitrogen: cycling out of control. Environ. Health Perspect 112: 557-563. DOI: 10.1289/ehp.112-a556

Gaskin, J.W., Speir, R.A., Harris, K., Das, K.C., Lee, R.D., Morris, L.A., and Fisher, D.S., 2010. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. Journal of Agronomy 102: 623-633. DOI: 10.2134/agronj2009.0083

Gentile, R., Vanlauwe, B., Van Kessel, C., Six, J., 2009. Managing N availability and losses by combining fertilizer-N with different quality residues in Kenya. Agriculture, Ecosystems and Environment 131: 308 314.

DOI: 10.1016/j.agee.2009.02.003

Ghaffari, H., Gholizadeh, A., Biabani, A., Fallah, A., and Mohammadian, M., 2018. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) application with different nitrogen fertilizer levels in rice (*Oryza sativa* L.). Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science 41: 701-714. (In Persian)

Guang, C., Tingting, C., Song, C., Chunmei, X., Xiufu, Z., and Danying, W., 2017. Polymer-coated urea application could produce more grain yield in super rice. Agronomy Journal 110: 246–259. DOI: 10.2134/agronj2017.07.0400

Herath, H.M., Arbestain, M.C., and Hedley, M., 2013. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol. Geoderma 209-210: 188–197. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.06.016

Hofmeier, M., Roelcke, M., Han, Y., Lan, T., Bergmann, H., and Bohm, D., 2015. Nitrogen management in a rice-wheat system in the Taihu region: Recommendations based on field experiments and surveys. Agriculture, Ecosystems and Environment 209: 60–73. DOI: 10.1016/j.agee.2015.03.032

Hollister, C.C., Bisogni, J.J., Lehmann, J., 2013. Ammonium, nitrate, and phosphate sorption to and solute leaching from biochars prepared from corn stover and oak wood. Journal of Environmental Quality 42: 137-144. DOI: 10.2134/jeq2012.0033

Hussain, M., Cheema, S.A., Abbas, R.Q., Ashraf, M.F., Shahzad, M., Farooq, M., and Jabran, K., 2018. Choice of nitrogen fertilizer affects grain yield and agronomic nitrogen use efficiency of wheat cultivars. Journal of Plant Nutrition 41: 2330-2343. DOI: 10.1080/01904167.2018.1509998

Jiang, Z., and Hull, R.J., 1998. Interrelationships of nitrate uptake, nitrate reductase, and nitrogen use efficiency in selected Kentucky bluegrass cultivars. Crop Science 38: 1623-1632. DOI: 10.2135/cropsci1998.0011183X003800060035x

Kamkar, B., Safahani-Langroudi, A., and Mohammadi, R., 2011. The use of minerals in crop nutrition (translation). Jihad University of Mashhad Publications. First Edition, Iran. 500 p. (In Persian).

Keshavarz, P., 2013. Management Strategies to Increase Nitrogen Consumption Efficiency in Agriculture. Land Management 1(1): 47-54.

Khorramjah, F., 2015. Introduction to Carboxymethylcellulose CMC and its applications in various industries, the first national conference on new techniques in laboratory equipment and materials of the Iranian oil industry, Tehran, https://civilica.com/doc/404011. (In Persian)

Koutcheiko, S., Monreal, C.M., Kodama, H., McCracken, T., and Kotlyar, L., 2006. Preparation and characterization of activated carbon derived from the thermo-chemical conversion of chicken manure. Bioresource Technology 98: 2459-2464. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.09.038

Kramer, A.W., Doane, T.A., Horwath, W.R., and Van Kessel, C., 2002. Combining fertilizer and organic inputs to synchronize N supply in alternative cropping systems in California. Journal of Agriculture, Ecosystems and Environment 91: 233-243. DOI: 10.1016/S0167-8809(01)00226-2

Krull, E.S., Baldock, J.A., Skjemstad, J.O., and Smernik, R.S., 2009. Characteristics ofbiochar: Organo-chemical properties. In Lehmann J. and S. Joseph (Eds.). Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Earthscan: London, UK.

Laird, D.A., Fleming, P.D., Karlen, D.L., Wang, B., and Horton R., 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. Geoderma 158:436–442. DOI: 10.1016/j.geoderma.2010.05.012

Lehmann, J., and Joseph, S., 2015. Biochar for environmental management: Science, Technology and Implementation. Earthscan Press, London.

Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., and Crowley, D., 2011. Biochar effects on soil biota- A review. Soil Biology and Biochemistry 43: 1812–1836. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.04.022

Lehmann, J., 2007. Bio-energy in the black. Frontiers in Ecology and the Environment. 5: 381-387. DOI: 10.1890/1540-9295(2007)5[381:BITB]2.0.CO;2

Lehmann, J., and Joseph, S., 2009. Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Earthscan Publications Limited, London. DOI: 10.1021/es902266r

Lehmann, J., Gaunt, J., and Rondon, M., 2006. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems-A review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 11(2): 403–427. DOI: 10.1007/s11027-005-9006-5

Lehmann, J., Da Silva, J.P., Steiner, C.J., Nehls, T., Zech, W., and Glaser, B., 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments. Plant and Soil 249: 343–357. DOI: DOI: 10.1023/A:1022833116184#citeas

Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J.O., Theis, J., Luizao, F.J., Peterson, J., and Neves, E.G., 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. Soil Science Society of America Journal 70: 1719–1730. DOI: 10.2136/sssaj2005.0383

Malekotti, M.J., and Ghayibi, M.N., 2000. Determining the critical level of effective nutrients in soil, plants and fruits in order to increase the quality and quantity performance of strategic products of the country. Second edition. Agricultural Education Publication. 92 p.

Malviya, P., Jha, A.K., and Upadhyay, V.B., 2012. Effect of different proportions of vermicompost and fertilizers on growth and yield of scented rice and soil properties. Annals of Agricultural Research 33(4): 228-234.

Masto, R.E., Ansari, M.A., George, J., Selvi, V.A., and Ram, L.C., 2013. Coapplication of biochar and lignite fly ash on soil nutrients and biological parameters at different crop growth stages of *Zea mays* L. Ecological Engineering, 58: 314–322. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.07.011

Moallim, A.A., Kamal, M.R., Muhammed, H.H., Mohd Soom, M.A., Zawawi M.A.M., Wayayok A., Che Man, H.B., 2018. Assessment of nutrient leaching in flooded paddy rice field experiment using Hydrus-1D. Water 10(6):785-803. DOI: 10.3390/w10060785

Moradi, A., and Aminian, M., 2012. Inventory of Iran greenhouse gas emissions in 2010. Science Cultivation 3(1): 55-59. DOI: 20.1001.1.2008935.1391.03.1.7.0

Motesharezadeh, B., Valizadeh-Rad, K., Dadrasnia, A., and Amir-Mokri, H., 2017. Trend of fertilizer application during the last three decades (Case study: America, Australia, Iran and Malaysia). Journal of Plant Nutrition 40(4): 532-542. DOI: 10.1080/01904167.2016.1250909

Nezarat, S., and Gholami, A., 2009. The role of double inoculation of *Azospirillum* and *Pseudomonas* bacteria in improving nutrient uptake. Journal of Agricultural Ecology 1(1): 32-25. DOI: 10.22067/JAG.V1I1.2651 (In Persian)

Nie, L., Peng, S., Chen, M., Shah, F., Huang, J., Cui, K., and Xiang, J. (2011). Aerobic rice for water-saving agriculture. A review. Agronomy for Sustainable Development, 32: 411-418. DOI: 10.1007/s13593-011-0055-8

Nigussie, A., 2012. Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of lettuces (*Lactuca sativa* L.) grown in chromium polluted soils. Journal of Agricultural and Environmental 12(3): 369-376. DOI:

Nolan, B.T., Hitt, K.J., and Ruddy, B.C., 2002. Probability of nitrate contamination of recently recharged groundwaters in the conterminous United States. Environmental Science and Technology 36: 2138-2145. DOI: 10.1021/es0113854

Novak, J.M., Busscher, W.J., Laird, D.L., Ahmedna, M., Watts, D.W., and Niandou, M.A.S., 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. Soil Science 174: 105-112. DOI: 10.1097/SS.0b013e3181981d9a

Paz-Ferreiro, J., Fu, S., Mendez, A., and Gasco, G., 2014. Interactive effects of biochar and the earthworm (*Pontoscolex corethrurus* L.) on plant productivity and soil enzyme activities. Journal of Soils and Sediments 14: 483–494. DOI: 10.1007/s11368-013-0806-z

Pedraza, R.O., Bellone, C.H., Bellone, S.C.D., Sorte, P.M.F.B., and Teixeira, K.R.D.S., 2009. *Azospirillum* inoculation and nitrogen fertilization effect on grain yield and on the diversity of endophytic becteria in the phyllosphere of rice rainfed crop. European Journal of Soil Biology 36-43. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2008.09.007

Peng, S., Buresh, R.J., Huang, J., Yang, J., Zou, Y., Zhong, X., Zou, Y., Yong, J., Wang, G., Liu, Y., Hu, R., Tang, Q., and Cui, K., 2011. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management. Journal of Sustainable Agriculture 2: 943-952. DOI: 10.1051/agro/2010002

Peoples, M.B., Gault, R.R., Scammell, G.J., Dear, B.S., Virgona, J., Sandral, G.A., Paul, J., Wolfe, E.C., and Angus, J.F., 2002. Effect of pasture management on the contributions of fixed N to the N economy of ley-farming systems. Australian Journal of Agricultural Research 49: 459-474. DOI: 10.1071/A97014

Pietikainen, J., Kiikkila, O., and Fritze, H., 2000. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus. Oikos 89: 231-242. DOI: 10.1034/j.1600-0706.2000.890203.x

Prasad, L.R.V., and Mailapalli, D.R., 2018. Evaluation of nitrogen fertilization patterns using DSSAT for enhancing grain yield and nitrogen use efficiency in rice. Communications Soil Science and Plant Analysis 1-17. DOI: 10.1080/00103624.2018.1464180

Ray, D.K., Mueller, N.D., West, P.C., and Foley, J.A., 2013. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. PloS One 8(6): 1-8. DOI: 10.1371/journal.pone.0066428

Redfern, S.K., Azzu, N., and Binamira, J.S., 2013. Rice in southeast Asia: Facing risks and vulnerabilities to respond to

climate change. In Proceedings of a Joint FAO/OECD Workshop, Rome, Italy, 23-24 April 2012, p.295-314.
Ri-Feng, K., Zhang, N.M., Jing, S., Li, B., and Zhang, C.G., 2014. Effect of biochar-based fertilizer on soil fertility, wheat growth and nutrient absorption. Soil and fertilizers 6: 33-38.
Roberts, T.L., 2008. Improving nutrient use efficiency. Turkish Journal of Agriculture and Forestry 32: 177-182.
Sarcheshmehpour, M., Sawaghebi, G., Saleh-Rastin, N., Alikhani, H.A., and Pourbabaei, A., 2009. Isolation, screening, relative identification and determination of salinity and drought tolerance of superior isolates of growth-promoting rhizosphere bacteria (PGPR) of pistachio trees. Iranian Soil and Water Research 40(2). DOI: 20.1001.1.2008479.1388.40.2.10.4 (In Persian with English Summary)
Semenov, M.A., Jamieson, P.D., and Martre, P., 2007. Deconvoluting nitrogen use efficiency in wheat: A simulation study. European Journal of Agronomy 26: 283-294. DOI: 10.1016/j.eja.2006.10.009
Sharpe, R.R., Harper, L.A., Giddens, J.E., and Langdale, G.W., 2001. Nitrogen use efficiency and nitrogen budget for conservation tilled wheat. Soil Science Society of America Journal.52: 1349-1398. DOI: 10.2136/sssaj1988.03615995005200050035x
Sheng-guo, C., Bing-qiang, Z., Yan-ting, L., Liang, Y., Wei, L., Zhian, L., Shu-wen, H., and Bing, S., 2015. Review grain yield and nitrogen use efficiency in rice production regions in China. Journal of Integrative Agriculture 14(12): 2456–2466. DOI: 10.1016/S2095-3119(15)61228-X
Singh, M., 2012. Influence of organic mulching and nitrogen application on essential oil yield and nitrogen use efficiency of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.). Archives of Agronomy and Soil Science 59: 273-279. DOI: 10.1080/03650340.2011.608157
Steiner, C., Glaser, B., Teixeira, W.G., Lehmann, J., Blum, W.E.H., and Zech, W., 2008. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171: 893-899. DOI: 10.1002/jpln.200625199
Tayefe, M., Gerayzade, A., Amiri, E., and Nasrollahzadeh, A., 2014. Effect of nitrogen on rice yield, yield components and quality parameters. African Journal of Biotechnology 13(1): 91-105. DOI: 10.5897/AJB11.2298
Turan, M., Ataoglu, N., and Sahin, F., 2006. Evaluation of the capacity of phosphate solubilizing bacteria and fungi on different forms of phosphorus in liquid culture. Journal of Sustainable Agriculture 28: 99-108. DOI: 10.1300/J064v28n03_08
Turgut, I., Bilgili, U., Duman, A., and Acikgoz, E., 2005. Effect of green manuring on the yield of sweet corn. Journal of Agronomy for Sustainable Development 25(4): 433-438. DOI: 10.1051/agro:2005044
Unkovich, M.J., and Pate, J.S., 2000. An appraisal of recent field measurements of symbiotic N_2 fixation by annual legumes. Field Crops Research 65: 211-228. DOI: 10.1016/S0378-4290(99)00088-X
Van Zwieten, V.L., Singh, B., Joseph, S., Kimber, S., Cowie, A., Chan, Y.K., 2009. Biochar and emissions of non-CO_2 greenhouse gases from soil. In: J. Lehmann and Joseph S. (Eds.), Biochar for Environmental Management Science and Technology. Earthscan Press, London, pp. 227-249.
Warnock, D.D., Lehmann, J., Kuyper, T.W., and Rillig, M.C., 2007. Mycorrhizal responses to biochar in soil–concepts and mechanisms. Plant and Soil 300: 9-20. DOI: 10.1007/s11104-007-9391-5
Worrall, V.S. and Roughly, R.J., 1976. The effects of moisture stress on infection of *Trifolium subteerraneum* L. by *Rhizobioum trifoli* Dang. Journal of Experimental Botany 27: 1233-1241. DOI: 10.1093/jxb/27.6.1233
Wu, L., Yuan, Huang, S.L., Sun, F., Zhu, G., Li, G., Fahad, S., Peng, S., and Wang, F., 2016. Physiological mechanisms underlying the high-grain yield and high-nitrogen use efficiency of elite rice varieties under a low rate of nitrogen application in China. Frontiers in Plant Science 7: 1-12. DOI: 10.3389/fpls.2016.01024
Xina, Y., Wenhaia, M., Shaofub, W., Lianghuana, W., and Jianqiuc, C., 2017. Rice responses to single application of coated urea on yield, dry matter accumulation and nitrogen uptake in Southern China. Journal of Plant Nutrition 40(15): 2181-191. DOI: 10.1080/01904167.2017.1346675
Yang, Y.C., Zhang, M., Zheng, L., Cheng, D.D., Liu, M., and Geng, Y.Q., 2011. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, yield, and quality of wheat. Agronomy Journal 103(2): 479-485. DOI: 10.2134/agronj2010.0343
Zhang, A.P., Liu, R.L., Gao, J., Zhang, Q.W., Xiao, J.N., Chen, Z., Yang, S.Q., Hui, J.Z., and Yang, L.Z., 2014. Effects of biochar on nitrogen losses and rice yield in anthropogenic alluvial soil irrigated with NingxiaYellow river water. Journal of Agro-Environment Science 33: 2395-2403.